

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Porovnání životností fréz upnutých v termoupínačích oproti
jiným způsobům upínání nástrojů**

Disertační práce

Studijní program: P2346 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303V002 Strojírenská technologie
Školitel: prof. Dr. Ing. Josef Brychta
Doktorand: Ing. Jaroslav Kunstfeld

Ostrava, 2015

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří byli pro mne oporou při tvorbě této práce a kteří přispěli k úspěšnému dokončení práce.

Poděkování patří hlavně mému školiteli prof. Dr. Ing. Josefu Brychtovi za cenné rady a pomoc při přípravě experimentální části, doc. Ing. Robertu Čepovi Ph.D. za podnětné připomínky a rady, Ing. Jiřímu Kratochvílovi Ph.D. za přečtení a pomoc při formálních úpravách. Dále patří můj dík Ing. Marku Pagáčovi Ph.D. za připomínky a rady při realizaci práce.

Dále patří můj dík pracovníkům firem KTP Technology s.r.o., zejména Ing. Jiřímu Tollrianovi a Ing. Josefu Povalovi za pomoc při vlastním měření při experimentech.

Dále rád děkuji rodinným příslušníkům za trpělivou všestrannou podporu po dobu celého doktorského studia.

Anotace disertační práce:

KUNSTFELD, Jaroslav

Porovnání životností fréz upnutých v termoupínačích oproti jiným způsobům upínání nástrojů.

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB- Technická univerzita Ostrava, 108 stran.

Školitel:

prof. Dr. Ing. Josef Brychta

Předkládaná práce se zabývá problematikou volby vhodných nástrojových držáků pro výrobu složitých dílců na CNC frézovacích strojů. Současná doba přináší masivní nasazení moderních CNC obráběcích strojů, kdy naprostá většina nově pořizovaných obráběcích strojů spadá do této kategorie. Pořízením numericky řízených strojů se zpravidla otevrou pro provozovatele nové odbytové možnosti, jak pro dodávky kvalitně obrobených dílců v případě kooperační výroby, tak při dodávkách kompletních celků. Pro zajištění optimální hospodárnosti a tedy maximální využití strojního času je nutné používat kvalitní a výkonné nástroje. Životnost především rotačních nástrojů je do značné míry také ovlivněna vlastnostmi použitých nástrojových držáků. Správná volba upínače fréz může podstatným způsobem prodloužit životnost nástroje, má vliv na jakost obrobené plochy a samozřejmě tím také na produktivitu celého výrobního uzlu. V odborné veřejnosti jsou odlišné názory na použití různých typů upínačů. Tyto názory se opírají o osobní zkušenosti a zpravidla nejsou podloženy exaktním měřením. V úvodu práce jsou popsány vlastnosti moderních nástrojových materiálů vyráběných práškovou metalurgií, včetně popisu výroby rotačních frézovacích nástrojů a jejich povlaků. Dále následuje kapitola s popisem v průmyslové praxi používaných nástrojových systémů. Na tuto kapitolu navazuje podrobnější popis termoupínačů a jejich příslušenství. V další kapitole následuje příprava experimentálního měření včetně nezbytné teorie a popisu použitých strojů a přístrojů. V poslední kapitole je uvedeno vyhodnocení naměřených dat vzhledem k použitým upínačům a dat získaných analýzou dosažené drsnosti z pohledu k akustickým projevům při obrábění a také k přínosu pro praktické využití a přínos vědecký.

Anonotation of Dissertation Thesis :

KUNSTFELD, Jaroslav *Comparison of the clamping of milling cutters in thermal fixtures with other tool clamping methods.*
Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology
Faculty of Mechanical Engineering, VSB - Technical University of
Ostrava, 108 pages.
Supervizor: prof. Dr. Ing. Josef Brychta

The submitted thesis deals with the problems of selecting appropriate tool holders for the manufacturing of complex components on CNC milling machines. The present time brings a massive application of CNC machine tools and an overwhelming majority of newly acquired machine tools fall to this category. By acquiring numerically controlled machines, operators gain new sales opportunities for supplies of both high quality machined components in the case of cooperation production and complete units. To ensure the optimum economy and thus the maximum machine time utilization it is necessary to use high quality and powerful tools. The service life of, in particular, rotating tools is to large extent influenced also by the properties of the tool holders used. The correct selection of milling fixtures can substantially extend the life of such tools, it has an influence on the quality of the machined surface and, obviously, also on the productivity of an entire production unit. The professional public have different opinions on using various types of fixtures. These opinions are based on personal experience and they are usually not supported by exact measurements. The introduction of the thesis describes the properties of modern tool materials manufactured by powder metallurgy including a description of the manufacturing of rotating milling tools and their coatings. The following chapter describes tool systems used in industrial practice. This chapter is followed by a detailed description of thermal fixtures including their accessories. The next chapter describes the preparation of experimental measurements including the necessary theory and description of the machines and instruments used. The last chapter provides an evaluation of the measured data in relation to the clamps used and data acquired by an analysis of the roughness reached in relation to acoustic signs during machining including the benefit for practical applications and for science.

Obsah :

Seznam použitého značení, symbolů a zkratk	7
1 Úvod	9
2 Cíle disertační práce	10
3 Způsoby upínání rotačních nástrojů	11
3.1 Obecná charakteristika způsobů upínání nástrojů	12
3.2 Podstata termoupínačů	14
3.3 Základní charakteristiky ostatních způsobů upínání	16
3.4 Typické aplikace pro jednotlivé druhy upnutí	16
3.5 Shrnutí	17
4 Řezné nástroje pro frézování	17
4.1 Teorie frézování	18
4.2 Teplota při frézování	25
4.3 Materiál frézovacích nástrojů	29
4.4 Slinuté karbidy	31
4.5 Povlakování slinutých karbidů	33
4.6 Metody povlakování	34
4.7 Klasifikace slinutých karbidů	38
4.8 Ostatní nástrojové materiály	40
4.9 Shrnutí	42
5 Opotřebení břitů nástrojů	42
5.1 Typické zóny opotřebení	46
5.2 Klasifikace opotřebení	47
5.3 Vyhodnocení „by eye“	49
5.4 Vyhodnocení výpočtem	49
5.5 Shrnutí	53
6 Drsnost povrchu	53
6.1 Parametry drsnosti povrchu	55
6.2 Měření parametrů drsnosti povrchu dotykovými profiloměry	58
6.3 Shrnutí	59
7 Termoupínače a jejich vliv na optimalizaci řezných podmínek	59
7.1 Manipulace s termoupínači	61
7.2 Přístroje pro indukční ohřev	63
7.3 Fyzikální princip indukčního ohřevu	64
7.4 Měření teploty	68
7.5 Shrnutí	70

8 Příprava experimentu	71
8.1 Příprava materiálu	75
8.2 Příprava pro frézování kruhovou interpolací	78
8.5 Shrnutí	85
9 Měření drsnosti obrobeného povrchu	80
9.1 Naměřené hodnoty	81
9.2 Měření kleštinového držáku, sousledné frézování	81
9.3 Měření držáku Weldon, sousledné frézování	83
9.4 Měření termoupínače, sousledné frézování	84
9.5 Měření kleštinového držáku, nesousledné frézování	87
9.6 Měření držáku Weldon, nesousledné frézování	88
9.7 Měření termoupínače, nesousledné frézování	89
9.8 Měření vibrací při obrábění	92
9.9 Měření upínačů při kruhové interpolaci	93
10. Závěry	95
10.1 Přínos pro využití v praxi	97
10.2 Vědecký přínos	98
11. Conclusions	98
11.1 Benefit for using in practice	99
11.2 Scientific benefit	100
Použitá a studovaná literatura	101
Publikační činnost autora	105
Seznam obrázků	106
Seznam tabulek	109
Seznam grafů	110

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ, SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Význam	Rozměr
CVD	Chemical Vapour Deposition – chemická vylučování z parní fáze	[-]
E	modul pružnosti	[MPa]
HB	tvrdost podle Brinela	[-]
HRC	tvrdost podle Rockwela	[-]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
ISO	International Organisation for Standardization Mezinárodní organizace pro standardizaci	[-]
KBN	kubický nitrid bóru	[-]
DIN	Deutsches Institut für Normung – německý institut pro normalizaci	[-]
KVS	opotřebení	[mm]
NO	nástrojové oceli	[-]
P,M,K, N,S,H	označení druhu řezného materiálu podle normy ISO 513:2002	[-]
PVD	Physikal Vapour Deposition fyzikální metoda nanášení povlaku.	[-]
HSC	High Speed Cutting - vysokorychlostní obrábění	[-]
HVC	High Volume Cutting - vysokoobjemové obrábění	[-]
K	součinitel přechování třísky	[-]
NC	Numerical Control – číslicové řízení jako systém	[-]
P	výkon	[W]
PKD	polykrystalický diamant	[-]
RO	rychlořezná ocel	[-]
ŘK	řezná keramika	[-]
SK	slinutý karbid	[-]
STM	supertvrdé materiály	[-]
VB	šířka opotřebované plochy na hřbetě nástroje	[mm]
VR	velikost radiálního opotřebení na čele nástroje	[mm]
PKBN	polykrystalický kubický nitrid bóru	[-]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
K	součinitel přechování třísky	[-]
D	obráběný průměr	[mm]
MTCVD	Middle Temperature Chemical Vapour Deposition chemická metoda nanášení povlaku při středních teplotách	[-]
Q_c	celkové množství tepla za jednotku času	[J. min ⁻¹]
Q_n	teplo odvedené nástrojem	[J]
Q_o	teplo odvedené obrobkem	[J]
K_{IC}	lomová houževnatost	[MPa.m ^{-1/2}]
Ra	parametr drsnosti – střední aritmetická úchylka	[μm]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
T_n	trvanlivost nástroje	[min]
a_p	hloubka řezu	[mm]
f	posuv	[mm]
n	otáčky	[min ⁻¹]
t	čas obrábění	[min]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
F_c	řezná složka síly obrábění	[N]
F_e	výsledná síla obrábění	[N]

F_f	posuvová složka síly soustružení	[N]
F_r	třecí síla	[N]
a_v	součinitel teplotní vodivosti	[m ² . s ⁻¹]
n	počet otáček za minutu	[min ⁻¹]
r_ε	poloměr zaoblení špičky obráběcího nástroje	[mm]
v_e	rychlost výsledného řezného pohybu	[m.min ⁻¹]
f_0	posuv na jednu otáčku frézy	[mm.ot ⁻¹]
f_z	posuv na jeden zub a jednu otáčku frézy	[mm.zub ⁻¹]
v_f	velikost podélného posuvu při frézování	[mm.min ⁻¹]
z	počet zubů frézy	[1]
h_i	okamžitá tloušťka odebírané vrstvy	[mm]
h_{max}	maximální tloušťka odebírané vrstvy	[mm]
h_{kr}	tloušťka třísky v závislosti na úhlu nastavení	[mm]
s	směrodatná výběrová odchylka	[-]
t	Studentova t hodnota	[%]
R_c, R_a, R_q	parametry drsnosti	[μm]
$\lambda_s, \lambda_c, \lambda_f$	filtry profilu při hodnocení drsnosti povrchu	[-]
δ	úhel styku při frézování	[°]
α	konstanta	[-]
α_o	úhel hřbetu v rovině ortogonální	[°]
ε_r	úhel špičky	[°]
φ	konstanta	[-]
γ_o	úhel čela v rovině ortogonální	[°]
γ_{ef}	měrná lomová energie	[MPa]
γ_F	lomová energie	[MPa]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
λ_s	úhel sklonu ostří	[-]
φ	polohový úhel řezného klínu	[°]
η	účinnost transformace	[-]
δ	hloubka vniku vířivých proudů	[mm]
ϱ	měrný odpor materiálu induktoru	[Ω.mm ² .m]
μ	poměrná permeabilita	[-]

1. ÚVOD

Současná doba je charakteristická neustálým zkracováním celého výrobního cyklu výrobku. Zkracovány jsou všechny etapy od marketingu až po termíny dodání hotového výrobku konečnému odběrateli. Nedílnou součástí tohoto trendu je zvyšování užitné hodnoty výrobků, zvyšování kvality zpracování počínaje designem až po stále užší výrobní tolerance při současném tlaku na co nejnižší cenu. Výrobci tak v mnoha případech musí, aby obstáli v tvrdém konkurenčním boji, ekonomicky využívat stávající výrobní kapacity. Volné investiční prostředky mohou směřovat pouze na uzlová místa výrobních toků.

Technický pokrok se ale projevuje ve všech odvětvích. V dnešní době je možné přistupovat i k dílčím modernizacím výrobních technologií, které ale v mnoha případech mají překvapivě velké potenciály. Je osvědčeným pravidlem vracet se po několika letech k zavedeným a spolehlivě fungujícím technologiím a modernizovat je s cílem zvýšení produktivity, kvality či snížení nákladů. V případě technologií frézování a vrtání je k dispozici mnoho nových nástrojů ze slinutých karbidů, cermetů, moderních HSS materiálů, případně jejich kombinací. Vývoj přináší také nové druhy povrchových úprav řezných hran. Tyto nástroje mohou podstatným způsobem zvýšit produktivitu obrábění na stávajících strojních zařízeních. Dokonce lze u některých materiálů s optimalizovanými povrchovými úpravami upustit od použití procesních kapalin. V takových případech úspory nabývají překvapivých hodnot. Použití moderních nástrojů ale zpravidla vyžaduje zajištění co nejstabilnějších podmínek v soustavě stroj – nástroj – obrobek.

U strojů jde zejména o zajištění správného chodu vřetene. U obrobků o jejich upnutí bez zbytečných deformací a u nástroje je potřeba dbát na co nejlepší souosost upnutého nástroje s osou rotace a to po celou životnost upínače. Tato poměrně drobná opatření mohou zvýšit trvanlivost ostří a zlepšit kvalitu obrobeného povrchu při optimálním využití řezivosti všech břitů nástroje. Samozřejmostí je zajištění těchto podmínek u HSC obrábění. Pro upínání nástrojů je k dispozici několik druhů upínačů pro různé upínací systémy používané na strojích. Pro některé specifické obráběčské operace je ale výběr upínačů omezen jejich rozměry vzhledem k obráběným dílcům a použitým technologiím. K těmto technologiím například patří obrábění forem na pětiosých obráběcích centrech s nakloněnou osou rotace vřetene, zejména při obrábění hlubokých kapes nástroji o malém průměru.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hromadné nasazení moderních, ale nákladných CNC obráběcích strojů do všech oblastí výrobního sektoru, přináší nutnost zajistit rentabilitu výrobních operací prováděných na těchto strojích. Pořízením numericky řízených strojů se zpravidla otevrou pro provozovatele nové odbytové možnosti. Tato flexibilita nových výrobních technologií, která je velkou výhodou pružné automatizace, však přináší nutnost použití kvalitních řezných nástrojů a jejich držáků. Výrobnost dané výrobní technologie je závislá na stupni jejího časového využití a samozřejmě také na produktivitě řezného procesu. Jak uvádí zahraniční odborná literatura, je z celkových nákladů na výrobu dílce třískovým obráběním pouze 10% nákladů na nástroje. Pro efektivnost procesu je nutné volit nejen vhodné nástroje ale také vhodné držáky nástrojů, které mají synergický potenciál zvýšení produktivity obrábění. Souběžně je třeba podotknout, že složitý proces obrábění lze obecně vystihnout a přesněji popsat jen se značnými obtížemi. Téměř nepřekonatelné obtíže spočívají ve vzájemné interakci řezného a obráběného materiálu, ale také v jejich chování v různých kombinacích při změnách řezných parametrů. Jedná se tedy o studium prostředí, které je přímo „nabitě“ problémy.

Cílem disertační práce je:

- Provedení literární rešerše upínání obráběcích nástrojů pro frézování.
- Experimentálně ověřit životnosti monolitních stopkových fréz upnutých v různých nástrojových držácích.
- Zjistit vhodnost použití nástrojových držáků různých typů pro operace frézování osazení.
- Vyhodnotit naměřená experimentální data.

3. Způsoby upínání rotačních nástrojů

Na moderních CNC obráběcích centrech, které se stávají vzhledem ke svým univerzálním vlastnostem nejrozšířenějšími stroji, se používají pro frézování drážek, osazení a dutin, mimo jiné rotační frézovací nástroje. Nejčastěji válcové vícebřité frézy zhotovené z monolitního slinutého karbidu. Tyto nástroje je možné upínat do různých nástrojových upínačů. Nejčastěji se používají kleštinové upínače rozličných konstrukčních uspořádání, upínače Weldon, hydroupínače, speciální sklíčidla a termoupínače.



Obr. 3.1 Kleštinový upínač pro nástrojový systém KM [45]



Obr. 3.2 Upínač Weldon [45]



Obr. 3.3 Hydraulický upínač [45]



Obr. 3.4 Sklíčidlový upínač nástrojů [45]

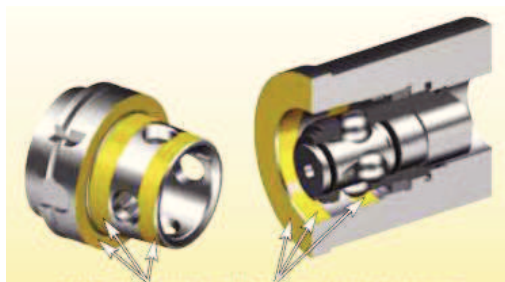


Obr. 3.5 Termoupínač [45]

3.1 Obecná charakteristika způsobů upínání nástrojů

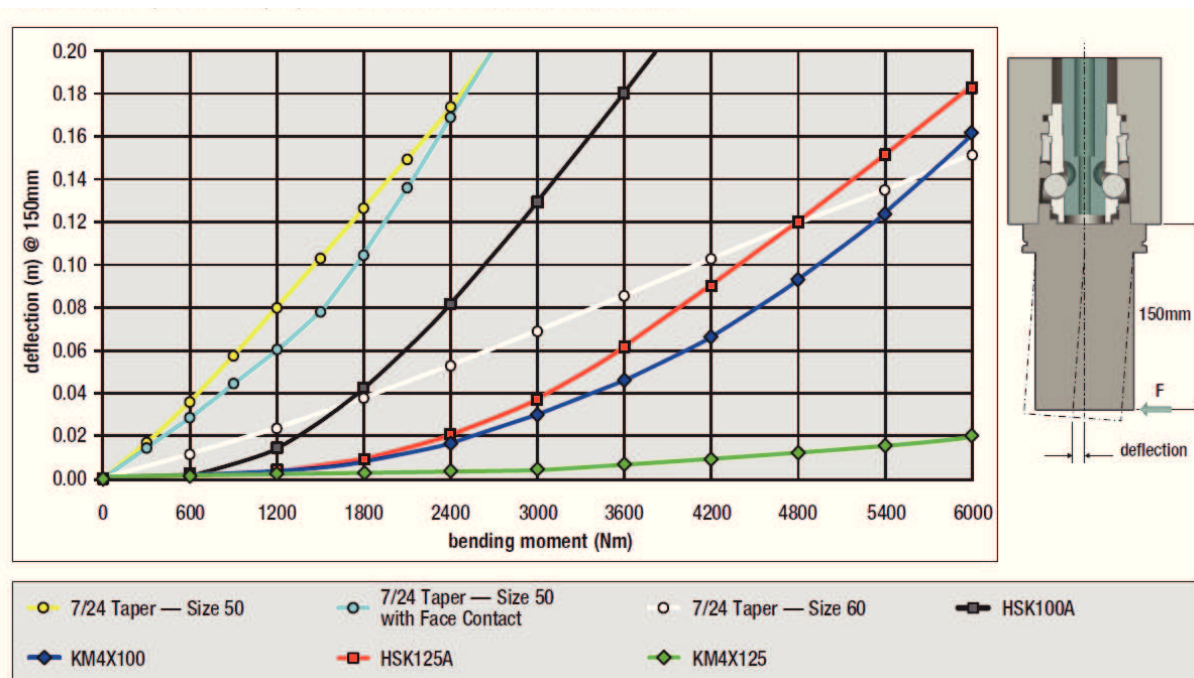
Základní funkcí všech používaných upínačů rotačních nástrojů je pevné upnutí nástroje s co nejmenší odchylkou osy nástroje od osy rotace vřetene obráběcího stroje, po celou životnost jak nástroje, tak upínače. Další důležitou funkcí upínače je přívod procesní kapaliny do místa řezu, v současnosti je mnohdy používán tlak kapaliny 60 a více barů. Pro správný chod

vřetene stroje a jeho dlouhou životnost je, zejména u vysokorychlostních strojů, nutné, aby upínač s upnutým nástrojem splňoval předepsanou podmínku celkové nevývahy. Důležitá je rovněž snadná manipulace s upínačem při výměně nástroje a seřizování délky nástroje. Z důvodu malých vnějších rozměrů výrobci obráběcích strojů přecházejí na nové upínací kužely nástrojových držáků. Nejrozšířenějšími se stávají upínací kužely HSK dle normy DIN 69893 a také KM ekvivalent HSK používaný především v USA a východní Asii.



Obr. 3.6. Upínače KM4x zobrazení radiálních a axiálních dotykových ploch [45]

Vzhledem k tomu, že při upínání dosedá nástrojový držák současně na kuželovou a čelní plochu, vykazuje tento držák velmi tuhé upnutí v upínací dutině při podstatně menších rozměrech místo dříve nejčastěji používaným nástrojovým držákům s upínacími kužely BT dle normy ISO – 1947. Vzhledem k menším vnějším rozměrům upínačům s kužely HSK je možné do zásobníků obráběcích strojů umístit větší množství nástrojových držáků s nástroji.



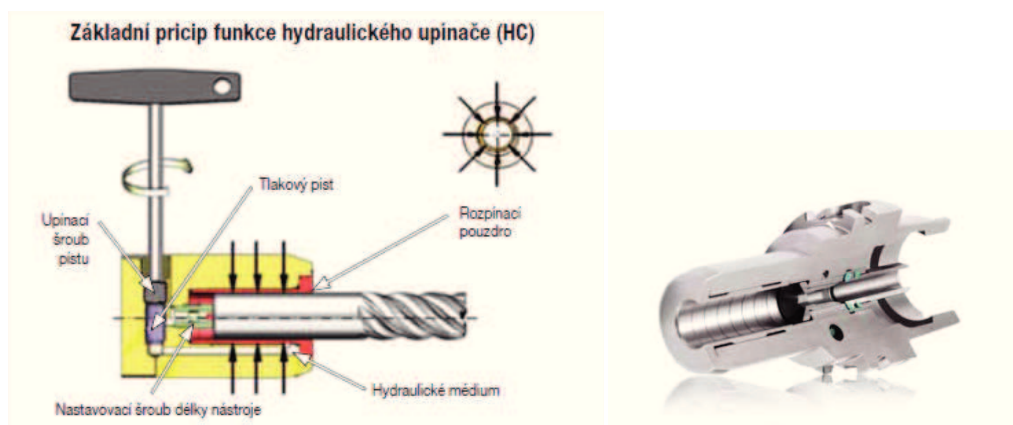
Legenda: bending moment - ohybový moment, deflection - odklon

Obr. 3.7 Graf průhybů různých upínacích systémů při zatížení [45]

Kleštinové upínače svírají upínaný nástroj po obvodě stopky pomocí vložené kleštiny, která je vtlačena do kuželové dutiny upínací maticí. Upnutí nástroje je poměrně pevné. Kleština vzhledem ke svým výrobním tolerancím vnáší určitou chybu souososti upnutí. Přenášený krouticí moment závisí na tom, jakým momentem byla dotažena upínací matice.

Upínače typu Weldon upínají nástroj vložený do dutiny upínače pomocí jednoho nebo dvou radiálně umístěných upínacích šroubů. Upnutí nástroje je spolehlivé, není ale možné nastavovat délku vysunutí nástroje z držáku, protože vysunutí je dáno polohou upínacích plošek vytvořených na válcové ploše upínací stopky nástroje. Upínací šroubky zvyšují nevývahu celku a odtlačí nástroj ke stěně dutiny upínače. Logicky tak zvyšují nesouosost nástroje s osou rotace vřetene.

Hydroupínače upínají nástroj pomocí tlaku hydraulické kapaliny, která rozpíná vnitřní tenkou dvojitou stěnu upínače k nástroji. Upnutí nástroje je dáno tlakem kapaliny, kterou vytváří malý píst na konci upínacího šroubu. V případě poklesu tlaku kapaliny je nástroj odepnut. Upínače zajišťují dobrou souosost nástroje s osou rotace. V radiálním směru vykazuje upínač určitou zbytkovou pružnost, která je dána tenkou vnitřní upínací stěnou a viskozitou hydraulického média.



Obr. 3.8. Řez hydroupínačem [45]

Sklíčidlový upínač upíná vložené nástroje čelistmi axiálně posouványými v kuželové dutině. Je používán především pro upínání vrtacích nástrojů. Přenášený krouticí moment také závisí na velikosti upínacího momentu. Upínač je náchylný k poruchám způsobeným drobnými nečistotami.

Termoupínač svírá nástroj po celé válcové ploše vlivem rozměrového přesahu vůči upínanému nástroji. Před upnutím nástroje se upínač musí zahřát na teplotu cca 350 °C. Do dutiny zahřátého upínače, která je vlivem tepelné dilatace zvětšena, se vloží nástroj. Po schlazení upínače je nástroj pevně sevřen. Upnutí nástroje je spolehlivé a není závislé na

obsluze. Upínače jsou vybaveny stavitelným dorazovým šroubem pro nastavení délky vysunutí nástroje. Při odepínání nástroje se opět musí upínač zahřát. Souosost upnutí nástroje je velmi dobrá. Vzhledem k tomu, že upínač je tvořen jediným celistvým tělesem, je také nevývaha velice malá. Upínač tak lze používat i pro stroje pracující s vysokými otáčkami vřetene.

3.2 Podstata termoupínačů

Jak již bylo uvedeno výše, termoupínač svírá nástroj po celé válcové ploše vlivem rozměrového přesahu vůči upínanému nástroji. Tento velmi prostý princip má svou výhodu v tom, že pro vytvoření upínací síly nejsou potřeba žádné, byť jednoduché, mechanismy, které vždy vnášejí do upínací soustavy nepřesnost či nevývahu. Na druhou stranu použitý princip přináší nutnost použití speciálního materiálu pro výrobu držáku z důvodu zajištění co nejmenších nežádoucích deformací způsobovaných opakovanými ohřevy upínače. Rozměrová stálost upínačů je výrobci [45] garantována na více jak 5 000 upínacích cyklů.

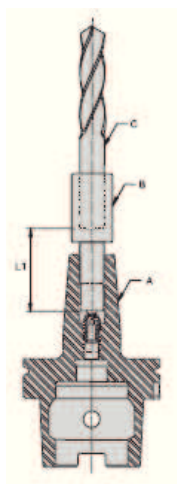


Obr. 3.9. Termoupínač s upínacím kuželem BT [56]

Souosost nástroje s osou rotace držáku ve vzdálenosti 3D od konce držáku bývá uváděna s hodnotami 0,003 až 0,005 mm, nevývaha bývá uváděna v rozsahu do G 6,3 při 15 000 ot/min [56].

Velmi důležitou výhodou těchto držáků je malý vnější průměr. Síla stěny na konci držáku bývá od 5 do 8 mm. To umožňuje upnutému nástroji práci v hlubokých kapsách při obrábění forem a to je důležité při obrábění na moderních pětiosých CNC strojích, pokud obrábí s nakloněným vřetenem pro eliminaci nulové řezné rychlosti v ose nástroje.

Pro použití termoupínače je nutný přístroj pro rychlý indukční ohřev upínací části. Velký gradient teploty ohřevu je nutný zejména v případě odepínání nástroje. Rychlost ohřevu musí být tak velká, aby se vzniklé teplo nestačilo rozšířit do upnutého nástroje. Z tohoto pohledu je nejnáročnější odepínání nástrojů z rychlořezné oceli, která má prakticky shodný teplotní koeficient délkové roztažnosti s materiálem upínače. Odepínání HSS nástrojů upnutých v termoupínačích s průměrem upínací stopky menším jak 5 mm je velkým problémem u všech nahřívacích přístrojů na trhu. V případě nástrojů ze slinutých karbidů je situace příznivější. SK má nižší součinitel délkové roztažnosti a nástroje je tak možné vyjmout v širším časovém pásmu bez omezení průměrem stopky nástroje. Nutnou podmínkou samozřejmě je, že stopky nástrojů budou zhotoveny v předepsaných tolerancích.



Obr. 3.10. Princip nastavení délky nástroje [57]

Pro seřízení délky upínaného nástroje v termoupínači je v tělese držáku dorazový šroub, který se pomocí přípravku seřídí na požadovanou délku vysunutí nástroje z tělesa upínače. Po nastavení dorazového šroubu se pomocný přípravek s nástrojem vyjme. Po ohřevu upínače se do dutiny vloží nástroj, na který se držák seřizoval.

3.3 Základní charakteristiky ostatních způsobů upínání

K základním charakteristikám ostatních způsobů upínání patří to, že vlastní upínací síla je vyvozena mechanismem nebo třetí součástí. Nástrojový držák se tak stává složitější pro výrobu. V mnoha případech je obtížné dosáhnout požadovaných hodnot souososti upnutého nástroje vůči ose rotace vřetene a zejména dosáhnout bez dodatečného vyvážení klidný chod nástroje při vysokých otáčkách vřetene obráběcího stroje.

3.4 Typické aplikace pro jednotlivé druhy upnutí

Typické aplikace pro jednotlivé druhy upnutí jsou dány především historií v daném podniku, kde je přirozená snaha navazovat na odzkoušené a dobře fungující technologie. V případě pořízení nových CNC technologií se zpravidla jedná o dodání stroje seřízeného na konkrétní dílec. V takovém případě o použití některého z uvedených způsobů upnutí nástrojů zpravidla rozhoduje technické oddělení dodavatele technologické vybavenosti stroje. V poslední době se v podnicích začíná používat metoda Tool management, která spočívá v přenesení veškeré kompetence v nástrojovém vybavení na dodavatelskou firmu. Podnik pak má za dohodnutou cenu neustále k dispozici veškeré potřebné vybavení. Tato forma pořízení technologické výbavy stroje má některé nesporné výhody. Může přinést ale i některá

nagativa v tom, že dodavatelská firma bude mít z pochopitelných důvodů svoje limity na snižování nákladů na nástroje.

Pro upínání vrtacích nástrojů ze slinutých nástrojů je potřeba dbát na dodržení maximální povolené excentricity špičky nástroje. Ta se dle jednotlivých výrobců nástrojů pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,03 mm [5].

Proto se zpravidla pro tyto nástroje používá upnutí do kleštinových upínačů, již méně přesných strojních sklíčidel. Výjimečně se používají upínače typu Weldon. Naopak pro některé přesné aplikace se rozšiřuje použití hydroupínačů.

Upínání válcových fréz ze slinutých karbidů nebo rychlořezné oceli se provádí nejčastěji upínacími držáky typu Weldon, nebo pomocí kleštinových upínačů. Stejný způsob upnutí se používá pro válcové frézy osazené VBD či tvarové frézy používané pro frézování forem. Házivost upnutých nástrojů se zpravidla nekontroluje, protože zvýšené hodnoty házivosti nevedou bezprostředně k destrukci nástroje.

4 Řezné nástroje pro frézování

Frézování je obrábění, které se provádí dvěma na sebe vázanými pohyby - rotačním pohybem nástroje a posuvným pohybem obrobku. V případě obrábění na portálových strojích může vykonávat všechny pohyby nástroj. Na moderních CNC obráběcích strojích je možné všechny pohyby plynule a navzájem nezávisle řídit včetně plynulé změny otáček vřetene. Fréza má obvykle větší počet zubů, které odebírají materiál. Výhodou frézování na současných výrobních technologiích je velký výkon z hlediska množství odebraného materiálu. Vynikající kvalita obrobeného povrchu v mnoha případech redukuje počet dokončovacích operací. Frézování se neustále vyvíjí ve stále univerzálnější metodu obrábění. Velkou výhodou frézování je to, že hlavní řezný pohyb vykonává nástroj. Na rozdíl od soustružení tak na dílec nepůsobí síly vznikající rotací dílce. Není tedy nutné uvádět do rotace hmotu obrobku s upínačem [6].

Frézování je velmi komplexním způsobem obrábění nejen z důvodu rozdílnosti způsobu obrábění, ale také vzhledem k rozmanitosti frézovacích strojů, rozdílných nástrojů a velké rozmanitosti obrobků. Je nutné si ovšem uvědomit, že na výsledek působí mnoho faktorů, zejména technický stav obráběcího stroje, charakter obrobků a jeho upínačů. Tyto faktory jsou do určité míry omezujícími podmínkami.

4.1 Teorie frézování

Pracovní pohyby nástroje a obrobku

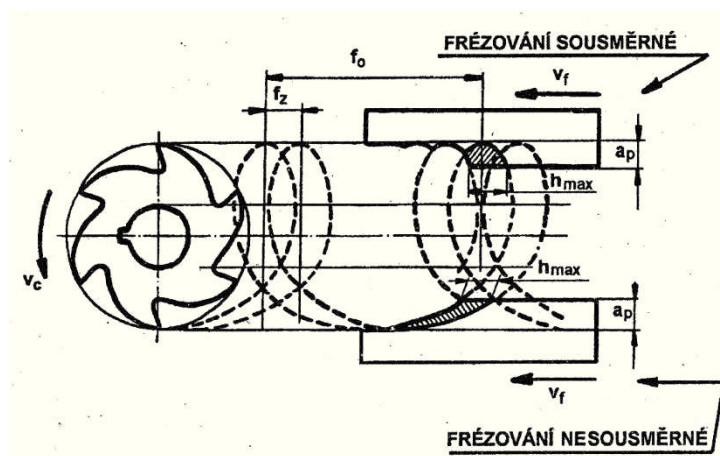
Frézování je způsob obrábění, při kterém se materiál obrobku odebírá vícebřitým nástrojem - frézou. Hlavní pohyb je rotační a vykonává ho nástroj. Posuv do řezu koná obrobek upnutý na pracovním stole stroje. Směr pohybu obrobku – přímočarý posuvný – je obvykle kolmý na osu otáčení nástroje. Podle rozložení řezných hran na tělese frézy a podle polohy osy otáčení nástroje vůči obrobku je možné frézování rozdělit do tří hlavních skupin:

- válcové frézování
- čelní frézování
- čelní válcové frézování

Dalšími skupinami je frézování tvarové, odvalovací a mnohé další varianty nejčastěji používané na jednoúčelových strojích.

Řezné hrany při válcovém frézování jsou na válcovém obvodu nástroje. Osa otáčení frézy je rovnoběžná s obrobenou plochou. Řezný pohyb je výslednicí rotačního pohybu frézy a

podélného pohybu obrobku. Výsledná dráha těchto pohybů, tj. dráha relativního pohybu břitu jednoho zubu frézy vzhledem k obrobku, je cykloida.



Obr. 4.01 Výsledná dráha relativního pohybu nástroje při frézování [11]

Vzdálenost posuvu bodů cykloidy za jednu otáčku nástroje určuje velikost posuvu na otáčku f_o a posuv na zub f_z . Hodnota posuvu nástroje vůči obrobku za 1 minutu se nazývá hodnotou rychlosti posuvu v_f .

$$f_o = f_z \cdot z \quad [mm \cdot ot^{-1}] \quad (4.1)$$

$$f_z = \frac{f_o}{z} \quad [mm \cdot zub^{-1}] \quad (4.2)$$

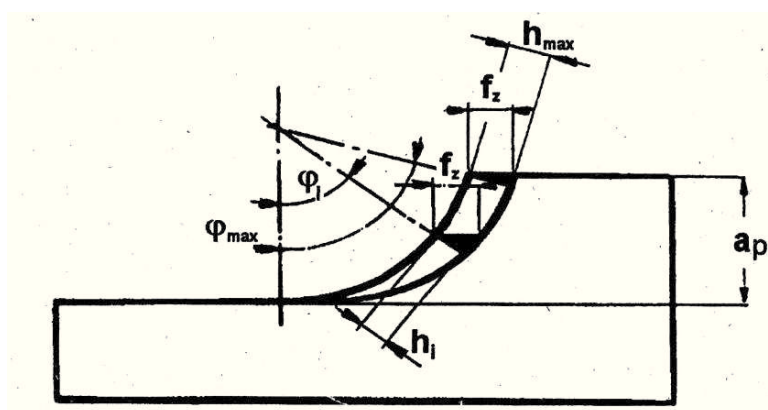
$$v_f = f_o \cdot n \quad [mm \cdot mm^{-1}] \quad (4.3)$$

n jsou otáčky frézy $[mm^{-1}]$

z je počet zubů frézy

Hloubka řezu a_p se nastavuje kolmo k ose frézy.

Velikost průřezu odebírané vrstvy klínem frézy závisí na orientaci řezného klínu vůči obrobku vyjádřené polohovým úhlem řezného klínu φ podle následujícího obrázku.



Obr. 4.02 Průřez frézou odebírané vrstvy materiálu [11]

Okamžitá tloušťka odebírané vrstvy podle obr. 4.2 je:

$$h_j = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (4.4)$$

Maximální tloušťky odebírané vrstvy:

$$h_{max} = f_z \cdot \sin \varphi_{max} \quad (4.5)$$

$$\cos \varphi_{max} = \frac{D - 2 \cdot a_p}{D} \quad (4.6)$$

kde D je průměr frézy [mm].

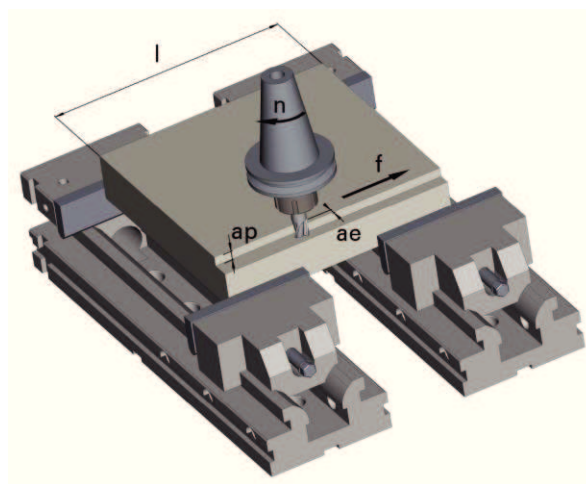
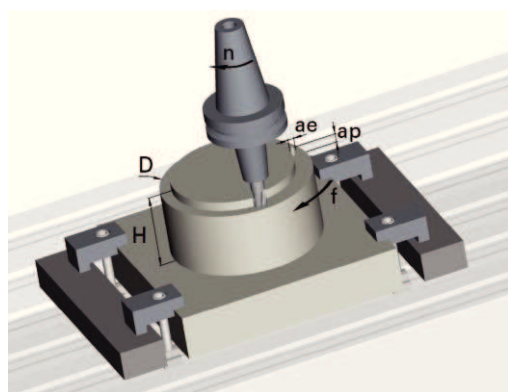
Jako řezná rychlost je pro zjednodušení považována rychlost hlavního pohybu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.7)$$

kde D je průměr frézy [mm]

n jsou otáčky frézy [min^{-1}]

Podle toho, jakým směrem se posouvá obrobek k nástroji, rozeznáváme sousledné a nesousledné frézování. Pokud se obrobek posouvá ve směru otáčení frézy, jde o sousledné frézování, pokud je směr opačný a obrobek se posouvá proti směru otáčení frézy, jedná se o nesousledné frézování. [11].



Obr. 4.03 Vlevo obrázek sousledného frézování, vpravo nesousledné frézování

Při nesousledném frézování podle obr. 4.3 vpravo, odebírá břit každého zubu tloušťku třísky od $h = 0$ až k hodnotě h_{max} .

Zpočátku břit materiál stlačuje a začne odřezávat až tloušťka třísky dosáhne určité velikosti, protože ostří frézy není ve skutečnosti ostrá hrana, ale těleso o poloměru $R = 8 \text{ až } 30 \mu\text{m}$.

Nevýhody:

- zhoršování jakosti obrobené plochy,
- zvětšování intenzity opotřebení,
- směr síly frézování s ohledem na upnutí,
- s postupujícím otupením nástroje výrazně stoupá odtlačování materiálu nástrojem.

Při sousledném frézování podle obr. 4.3 vlevo odebírání každý břit rotačního nástroje třísky o tloušťce od h_{max} až k hodnotě $h = 0$.

Výhody:

- výsledná síla frézování směřuje do obrobku,
- zmenšuje se náchylnost ke chvění,
- dosáhne se lepší jakosti frézované plochy,
- Je možné použít vyšší hodnoty posuvů na zub při nezměněné trvanlivosti a tím lze dosáhnout vyšší produktivity frézování. U_h se při sousledném frézování zvýší až o 100% v porovnání s frézováním nesousledným.

Nevýhody:

- větší silový ráz při záběru každého zubu do material. Lze do určité míry kompenzovat nástrojem se šikmými zuby.
- nevhodné pro materiál s tvrdým a znečištěným povrchem poškozujícím ostří nástroje.

Výsledná síla F při frézování působící na nástroj se rovná vektorovému součtu sil F_i působících na jednotlivé zuby v záběru:

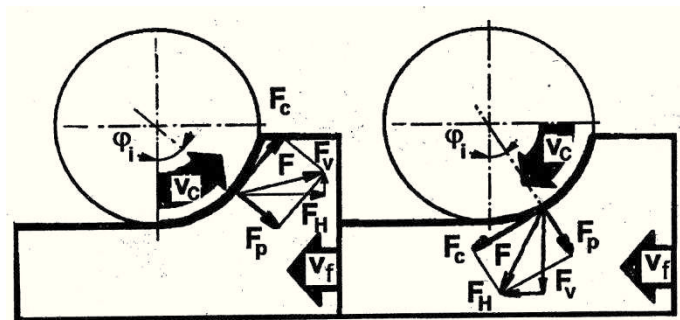
$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots = \sum F_i \quad [\text{N}] \quad (4.8)$$

Vztah platí jak pro řeznou složku síly frézování F_{ci} tak i pro složku pasivní F_{pi} .

$$F_c = \sum F_{ci} \quad [\text{N}] \quad (4.9)$$

$$F_p = \sum F_{pi} \quad [\text{N}] \quad (4.10)$$

Výslednou složku síly při frézování působící na nástroj s přímými řeznými hranami je možné podle obr. 11.4 rozložit na složku řeznou F_c a složku pasivní F_p rovněž na složku ve směru horizontálním F_H a na složku ve směru vertikálním F_V .



Obr. 4.04 Silové poměry při nesousledném a sousledném frézování [11]

Pro horizontální sílu platí:

$$F_H = \sum (F_C \cdot \cos \varphi_i \pm F_P \cdot \sin \varphi_i) \quad [\text{N}] \quad (4.11)$$

F_H působí při sousměrném frézování ve směru posuvu, při nesousměrném frézování proti směru posuvu.

Pro vertikální složku platí:

$$F_V = \sum (F_C \cdot \sin \varphi_i \pm F_P \cdot \cos \varphi_i) \quad [\text{N}] \quad (4.12)$$

Znaménko + platí pro sousledné frézování, znaménko – platí pro nesousledné frézování.

Empirické vztahy pro výpočet středních hodnot složek F_V a F_H s ohledem na velikost F_C jsou následující:

Sousledné frézování:

$$F_V = (0,7 \div 0,8) F_C \quad [\text{N}] \quad (4.13)$$

$$F_H = (0,8 \div 0,9) F_C \quad [\text{N}] \quad (4.14)$$

Nesousledné frézování:

$$F_V = (0,2 \div 0,3) F_C \quad [\text{N}] \quad (4.15)$$

$$F_H = (1,0 \div 1,1) F_C \quad [\text{N}] \quad (4.16)$$

Při frézování nástrojem se zuby ve šroubovici působí ve směru osy frézy vedle složek F_V a F_H složka $F_O = F_C \cdot \tan \omega$. [N] (4.17)

Složka této síly, pokud jsou zuby nástroje ve šroubovici o stejném smyslu jako směr otáčení nástroje, způsobuje vytahování nástroje z upínače, případně celého upínače ze vřetena stroje.

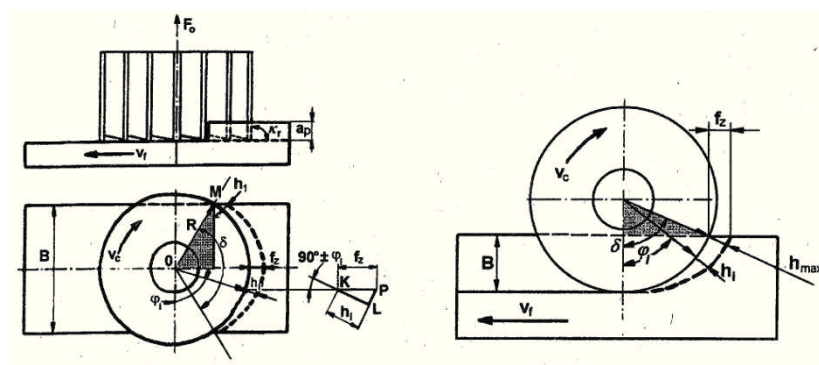
Při čelním frézování jsou řezné hrany rozloženy na čele nástroje, tj. na ploše kolmé k ose frézy. Dráha cykloidy řezného pohybu čelních zubů frézy leží v rovině rovnoběžné s obrobenou plochou. Hloubka řezu se nastavuje ve směru frézy. Podle směru hlavního pohybu a posuvu dělíme čelní frézování na:

sousledné a nesousledné, podle polohy otáčení frézy k obrobené ploše na symetrické a nesymetrické. Je-li šířka frézované plochy B rovna průměru frézy D jde o frézování plné, úhel styku $\delta = 180^\circ$. Okamžitou tloušťku třísky h_j pro $\kappa_r = 90^\circ$ je možné vyjádřit vztahem:

$$h_j = f_z \cdot \cos(90^\circ - \varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_j \quad [\text{mm}] \quad (4.18)$$

V ose symetrie pro $\varphi = 90^\circ$ pak platí vztah :

$$h_j = f_z \cdot \sin 90^\circ = f_z \quad [\text{mm}] \quad (4.19)$$



Obr. 4.05 Symetrické frézování a v levé části nesymetrické frézování [11]

Pro symetrické frézování podle obr. 4.5, lze určit velikost stykového úhlu δ z výrazu :

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{MN}{OM} = \frac{\frac{B}{2}}{\frac{D}{2}} = \frac{B}{D} \quad [^\circ] \quad (4.20)$$

Při symetrickém frézování se při náběhu a výběhu frézy z řezu mění tloušťka třísky z h_1 na hodnotu h_{max} , odpovídající úhlu $\varphi = 90^\circ$, potom platí vztahy :

$$h = h_1 \quad h_1 = f_z \cdot \cos \frac{\delta}{2} \quad [\text{mm}] \quad (4.21)$$

$$h = h_{\max} \quad h_{\max} = f_z \cdot \sin \varphi_{\max} = f_z \cdot \sin 90^\circ = f_z \quad [\text{mm}] \quad (4.22)$$

Pro nesymetrické frézování podle obr. 4.5 se stanoví stykový úhel z následujícího vztahu:

$$\cos \delta = \frac{D-2B}{D} = 1 - 2 \frac{B}{D} \quad [^\circ] \quad (4.23)$$

Při nesymetrickém nesouměrném frézování se tloušťka třísky mění z hodnoty h_{\max} do hodnoty $h=0$. Uvedené vztahy pro tloušťku trisky platí pro úhel nastavení

$\kappa_r = 90^\circ$. Pro $\kappa_r < 90^\circ$ je tloušťka třísky :

$$h_{\kappa_r} = h \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (4.24)$$

h je tloušťka třísky

κ_r je úhel nastavení řezné hrany

Sílu frézování F_i působící na ostří čelní frézy s úhlem nastavení $\kappa_r = 90^\circ$ lze rozložit na složky F_{ci} a F_{pi} nebo na složku F_{Hi} ve směru posuvu, a na složku F_{Vi} působící ve směru přísuvu. Pro frézy kde je úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r < 90^\circ$, vzniká další složka řezné síly F_o působící v ose nástroje. Velikost síly F_o je funkcí úhlu κ_r . Frézy s úhlem $\kappa_r < 90^\circ$ se používají tam kde je dostatečná tuhost soustavy S - O - N

a také tam, kde je vznikající osová síla F_o výhodná z hlediska upnutí obrobku či jeho tuhosti.

Okamžitá velikost síly frézování a jejich složek je rovna vektorovému součtu:

$$F = \sum F_i, \quad F = \sum F_{Hi} \quad [\text{N}] \quad (4.24, 4.25)$$

$$F_C = \sum F_{Ci}, \quad F_V = \sum F_{Vi} \quad [\text{N}] \quad (4.26, 4.27)$$

$$F_P = \sum F_{pi}, \quad F_O = \sum F_{oi} \quad [\text{N}] \quad (4.28, 4.29)$$

Empirické vztahy pro výpočet středních hodnot složek síly F_V , F_H a F_O vzhledem k řezné složce síly frézování F_C jsou následující. [11].

Čelní symetrické frézování

$$F_V = (0,85 \div 0,95) \cdot F_C \quad [\text{N}] \quad (4.30)$$

$$F_H = (0,30 \div 0,40) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.31)$$

$$F_O = (0,50 \div 0,55) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.32)$$

Nesymetrické frézování sousledné

$$F_V = (0,45 \div 0,70) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.33)$$

$$F_H = (0,60 \div 0,90) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.34)$$

$$F_O = (0,50 \div 0,55) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.35)$$

Nesymetrické frézování sousledné

$$F_V = (0,90 \div 1,00) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.36)$$

$$F_H = (0,15 \div 0,30) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.37)$$

$$F_O = (0,50 \div 0,55) \cdot F_C \quad [N] \quad (4.38)$$

Při zkouškách jednotlivých upínačů se bude síla nepřímo měřit sledováním příkonu elektromotoru vřetene. Pro výpočet použijeme jeden ze základních vztahů pro výpočet výkonu:

$$P = F \cdot v \quad [W] \quad (4.39)$$

Pro výpočet složky síly při rotačním pohybu použijeme transformaci vztahu:

$$P = M k \cdot \omega \quad [W] \quad (4.40)$$

$$\text{kde} \quad \omega = 2\pi f \quad [\text{rad} \cdot \text{sec}^{-1}] \quad (4.41)$$

Měření budeme kalibrovat měřením proudu při chodu naprázdno, za jmenovitých otáček vřeteníku. Po zatížení vřetene stroje definovaným kroutícím momentem, vytvořeným rezným odporem při frézování se tak bude odečítat rozdíl hodnot příkonu motoru vřetene pod zatížením a zatížení pohonu vřetene při chodu naprázdno.

4.2 Teplo a teplota při obrábění

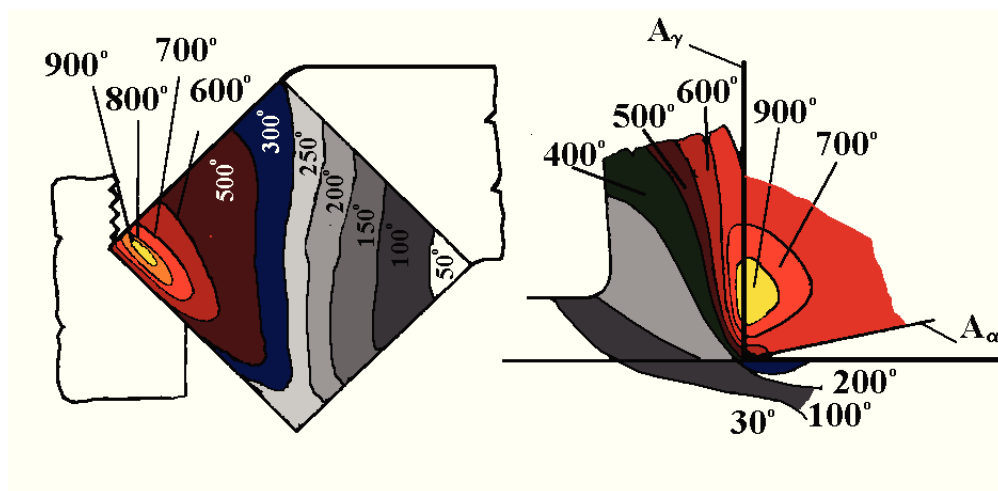
Práce nutná k odřezání části materiálu se prakticky celá proměňuje v teplo. Množství tepla vznikající při obrábění za jednu minutu Q_c lze stanovit ze vztahu:

$$Q_C = F_C \cdot v \cdot t \quad [\text{J}] \quad (4.42)$$

F_C řezná složka síly obrábění

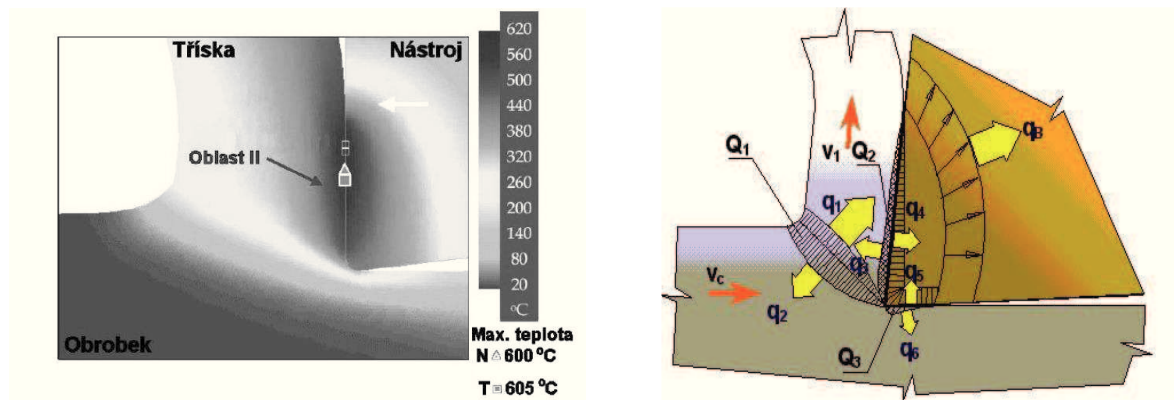
v řezná rychlost

t doba řezání



Obr. 4.06 Rozložení teplot v třísce, nástroji a obrobku [26]

Vzniklé teplo Q_C se šíří vedením a konvencí z místa zdroje do třísky, obrobku nástroje a okolního prostředí ve směru teplotního gradientu dle obr. 4. 07.



Obr. 4.07 Rozložení tepelného pole při obrábění [26]

Následkem tohoto jevu je vznik teplotního pole, které je prostorové a nestacionární. Ustálení tohoto pole nastává až po určité době řezání. Teplota elementu prostorového teplotního pole v daném okamžiku závisí na celé řadě charakteristik. Mezi ně patří:

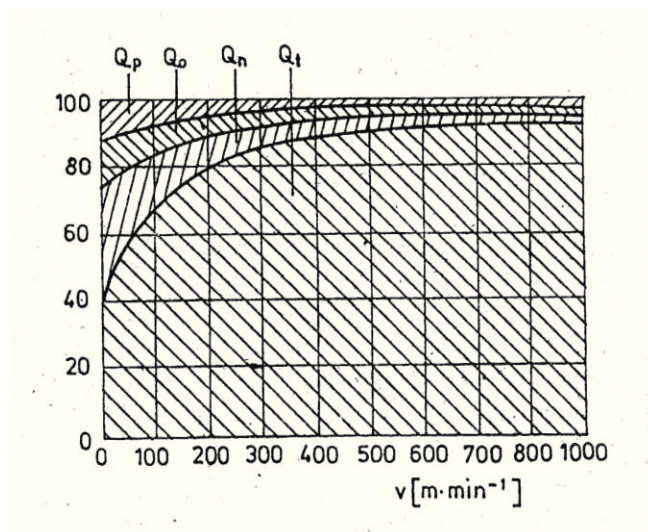
- fyzikální vlastnosti materiálu nástroje a obrobku,
- řezné podmínky,
- způsob obrábění,
- řezné prostředí.

- Q_1 - je teplo uvolněné v oblasti primární plastické deformace
- Q_2 - je teplo uvolněné při kontaktu čela obráběcího nože s odcházející třískou, teplo vzniká dvojí transformací :
- přeměnou práce sekundární plastické deformace,
 - přeměnou práce tření třísky po čele nástroje.
- Q_3 - je teplo uvolněné při kontaktu hřbetu obráběcího nástroje s řeznou plochou a je tvořeno :
- přeměnou práce plastické deformace povrchu obrobku,
 - přeměnou práce tření hřbetu po obrobené ploše.

Ze zdroje Q_1 směřuje tepelný tok do třísky a současně do obrobku, Q_2 směřuje do třísky a nástroje a Q_3 má směr do nástroje a obrobku. Okolní prostředí přejímá teplo přestupem z povrchu třísky, nástroje a obrobku. Platí rovnice tepelné bilance při obrábění :

$$Q_C = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_t + Q_n + Q_o + Q_p \quad [\text{J}] \quad (4.43)$$

Podíl jednotlivých složek závisí na řezné rychlosti jak je patrné z obr. 4.08



Obr. 4.08 Závislost rozložení tepelné bilance na řezné rychlosti [15]

Přímé měření množství tepla obsaženého v třískách při obrábění se stanovuje měřením teploty třísek v kalorimetru. Odletující horké třísky jsou bezprostředně po oddělení z obrobeného materiálu zachycovány do kalorimetru. Následně je měřením teploty a výpočtem zjištěno množství tepla odvedeného třískou a tím zjištěno jaký podíl práce vstupující do procesu obrábění je přeměněn na teplo třísky.



Obr. 4.09 Reálný obrázek třísek vznikajících při sousledném obrábění

Výpočet množství tepla obsaženého v kalorimetru Q_K dle vztahu:

$$Q_K = (T_k - T_o) \cdot (m_v \cdot c_v + m_n \cdot c_n + m_o \cdot c_o + V_k) \quad [\text{J}] \quad (4.44)$$

- m_v, m_n, m_o - hmotnost vody, nástroje a obrobku
- c_v, c_n, c_o - měrné teplo vody, nástroje a obrobku
- V_k - vodní hodnota kalorimetru

Ztrátové teplo:

$$Q_z = Q_c - Q_k \quad [\text{J}] \quad (4.45)$$

Po dosazení z rovnic 4.44 a 4.45 platí vztah :

$$Q_z = F_c \cdot v \cdot t - (T_k - T_o) \cdot (m_v \cdot c_v + m_n \cdot c_n + m_o \cdot c_o + V_k) \quad [\text{J}] \quad (4.46)$$

Pro teplo odvedené třískou platí:

$$Q_t = (T_k - T_o) \cdot (m_t \cdot c_t + m_v \cdot c_v + V_k) \quad [\text{J}] \quad (4.47)$$

Pro teplo odvedené nástrojem platí:

$$Q_n = (T_k - T_o) \cdot (m_n \cdot c_n + m_v \cdot c_v + V_k) \quad [\text{J}] \quad (4.48)$$

Pro teplo odvedené obrobkem platí:

$$Q_o = (T_k - T_o) \cdot (m_o \cdot c_o + m_v \cdot c_v + V_k) \quad [\text{J}] \quad (4.49)$$

Tyto vztahy samozřejmě platí pro obrábění bez použití procesní kapaliny. Při jejím použití není možné objektivně zjistit teplotu odvedené třísky. [15].

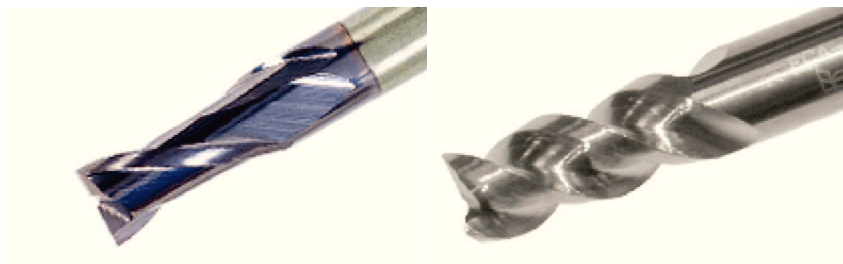
4.3 Materiály frézovacích nástrojů

Zkoumání vlastností upínačů bude prováděno za použití identických monolitních nástrojů, tříbřitých válcových fréz typu F3AU1770BDK38 zhotovených metodou broušení zplna z roubíku materiálu jakosti KC643M. Výrobce nástroje je firma Kennametal, nástroje byly vyrobeny v jejím sesterském závodě v Izraeli. [45].

Rozhodující vlastností obráběcích nástrojů je řezivost. Ta představuje souhrn vlastností, které vyjadřují schopnost rezného materiálu řezat obráběný materiál za fyzikálních podmínek charakteristických pro řezání. Právě požadavek na schopnost řezat za charakteristických, tedy pro různé materiály a metody řezání rozdílných podmínek, vyplývají různé požadavky na rezné materiály. Pro dosažení vysoké životnosti a trvanlivosti nástroje a pro dosažení předepsané jakosti povrchu je nutné volit optimální druh rezného material. Vše samozřejmě závisí na základě hlubokého poznání jevů probíhajícím v zóně řezání. Jednou ze základních vlastností zóny řezání je místně velmi vysoká teplota, která má, mimo jiné, přímou závislost na rezné rychlosti. Odolnost proti vysokým teplotám je jednou z nejdůležitějších vlastností nástrojových materiálů. Dalšími důležitými vlastnostmi jsou mechanická odolnost a technologické vlastnosti.

Tvrdoost a trvanlivost při vysokých teplotách řezání charakterizují nepřímo dva velmi významné faktory kvality nástroje. Prvním faktorem je maximální dovolená rezná rychlost – pokud je omezena stupněm ohřátí, druhým faktorem je odolnost proti otupení v ohřátém stavu. To je důvod postupného přechodu v historii obrábění od uhlíkových nástrojových nástrojů k nízko a vysokolegovaným, rychlořezným ocelím a materiálům zhotovených práškovou metalurgií. Materiály zhotovené práškovou metalurgií mají nejvyšší odolnost proti vysokým teplotám.

Důležitou vlastností nástrojových materiálů je mechanická pevnost, která je u nástrojových ocelí rozdílná. Zpravidla se vyhodnocuje tahovou zkouškou. Typické pro tyto materiály je, že je velmi málo znatelná mez kluzu. Nejnovější nástrojové oceli pro specifické účely se vyrábí metodou práškové metalurgie. Ve strojírenské praxi jsou v současné době daleko více rozšířenější nástroje ze slinutých karbidů.



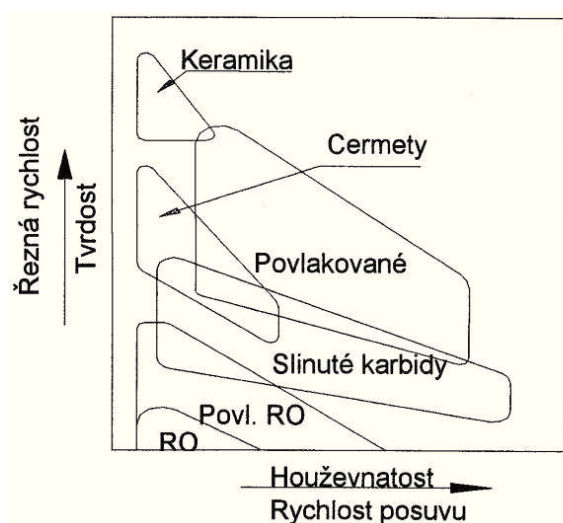
Obr. 4.10 Povlakovaný a nepovlakovaný frézovací nástroj ze slinutého karbidu. [45]

Řezné nástroje ze slinutých karbidů mají poměrně vysokou trvanlivost a odolnost proti otupení za vysokých teplot. Významnou vlastností je vysoká tvrdost, která je způsobena karbidy kovů. Tvrdost je závislá na chemickém složení, zrnitosti a mikrostruktuře. Je vyšší se stoupajícím obsahem karbidů kovů, stupněm disperse krystalů a procentuálním obsahem tuhého karbidového roztoku. Slinuté karbidy na bázi titanwolframu jsou tvrdší než slinuté karbidy čistě wolframové. Pojícím prvkem ve struktuře slinutého karbidu je kobalt. Nejvyšší tvrdost slinutých karbidů bývá při obsahu kobaltu mezi 3 až 5%. Slinuté karbidy mají poměrně vysokou křehkost, z tohoto důvodu se pevnost v tahu obvykle neudává. Důležitou vlastností je vysoký modul pružnosti, který je u některých druhů slinutých karbidů až 3 x větší než u oceli a dosahuje hodnot $6,4 \times 10^5$ MPa. Vrubová houževnatost je malá, je ale závislá na teplotě. Při teplotě 300°C se zvyšuje dvojnásobně, při teplotě 600°C se snižuje na výchozí úroveň. Tepelná vodivost slinutých karbidů je ve srovnání s ocelovými nástroji větší.

Další velkou skupinou nástrojových materiálů jsou keramické materiály. Ty se však při výrobě monolitních frézovacích nástrojů zatím nepoužívají. Avšak pro určité speciální obráběcí operace se vyrábí nástroje s cermetovými břity či celou cermetovou funkční částí.

Požadavky kladené na řezné materiály:

- pevnost v tvrdost v tlaku,
- pevnost za tepla a odolnost proti teplotním rázům,
- odolnost proti otěru,
- houževnatost a pevnost v ohybu,
- vysoká řezivost – schopnost oddělovat třísku,
- odolnost proti vzniku trhlin a pevnost vazby vnitřních fází,
- chemická stálost a chemicky neutrální chování vůči obráběným materiálům.



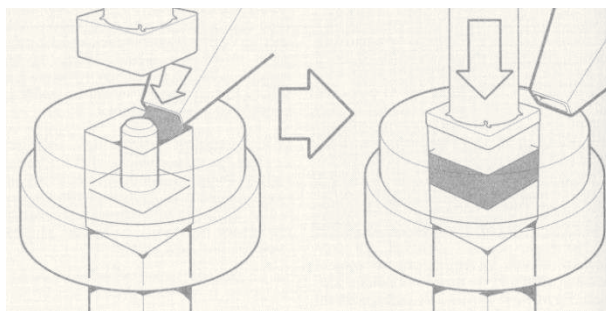
Obr. 4.11 Tabulka s názorným grafem oblastí aplikace nástrojových materiálů [12]

4.4 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou materiály vyráběné práškovou metalurgií. Struktura materiálu je tvořena karbidy vysokotavitelných karbidů wolframu WC, titanu TiC. Pojícím materiálem je zpravidla kobalt Co. Existuje velké množství slinutých karbidů. Od různých výrobců se liší používáním dalších přísad, například karbidů tantalu TaC, niobu NbC. První průmyslové použití slinutých karbidů nastalo ve dvacátých letech minulého století v Německu, výrobce prvních nástrojů ze slinutého karbidu byla firma Widia. Surovinou pro výrobu slinutých karbidů je koncentrát wolframové rudy, zpravidla scheelit CaWO_4 nebo wolframit $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$. Vsádka obsahuje zhruba 70 hmotnostních % oxidu wolframu. Dalším krokem je získání roztoku wolframanu amonného z koncentráту. Ten se získává pomocí kyseliny chlorovodíkové HCl za současného mletí v kulových mlýnech. Při chemické reakci vzniká H_2WO_4 a chlorid vápenatý CaCl_2 . Po odstranění hlušiny se kyselina wolframová propírá v nádrži s amoniakem $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ při tomto postupu reaguje kyselina na wolframan amonný.

Wolframan amonný se po odfiltrování od zbytku vsádky odpaří a po krystalizaci se vyžihá na oxid wolframový WO_3 . Takto získaná surovina je mimořádně čistá a redukcí oxidu wolframového vodíkem vzniká wolframový prášek W a voda H_2O . Změnou podmínek redukce lze získat prášek s rozdílnou zrnitostí. Po získání šarže prášku s definovanou zrnitostí se do prášku přimíchají saze C. Po promíchání následuje operace karburace ve vysokofrekvenčních pecích. Při této chemické reakci se slučuje v ochranné atmosféře wolfram W s uhlíkem C na karbid wolframu. Teplota nutná pro karburaci je 1700°C . Obdobným způsobem se vyrábí karbid tantalu a karbid niobu. Karbid titanu se nevyrábí samostatně, ale společně s karbidem wolframu. Při teplotách nad 2000°C rozpustí karbid titanu a karbid wolframu a vytvoří požadovaný směsný karbid $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}$. Poslední surovina, kobaltový prášek, se získává redukcí oxidu kobaltu s vodíkem při teplotě 800°C . Podle požadovaných vlastností finálního výrobku, se mísí prášek kobaltu s práškem karbidu v přesně daném poměru a následně se melou. Mlecí tělíska kulových mlýnů jsou ze slinutého karbidu pro vyloučení kontaminace vsázky nežádoucími prvky. Proces mletí probíhá za mokra a stává se tak homogenní a stejnoměrný. Vytváří se zrníčka kobaltu a karbidu s reaktivním povrchem, která vzájemně přilnou. Po dokončení mletí se odstraní kapalina a po kontrole jakosti vyrobeného prášku následuje operace lisování.

Lisování karbidového prášku do žadaného tvaru se provádí na lisech za použití lisovacích forem. Tvar výlisků musí být ovšem lisováním vyrobitelný. Pokud tvar nelze vylisovat, tak se dodatečně brousí. Pro usnadnění lisování se do prášku přidává mazadlo. Při lisování je nutné počítat se smrštěním výrobku při následující operaci slinování. Porezita výlisku je zhruba 50%. Z toho vyplývá rozměrové smrštění stran mezi 17 -20% a o tuto hodnotu musí být výlisek větší.



Obr. 4.12 Princip lisování prášku v lisovacím nástroji [25]

Slinování je proces při kterém je v řízené atmosféře výlisek zahříván na teplotu 1400 – 1600°C. Pro dosažení různého složení substrátu pro výrobu břitových destiček nebo polotovarů pro výrobu rotačních nástrojů se používají různé metody slinování. Důležitá je průběžná kontrola všech důležitých parametrů teplot a dob průběhů jednotlivých operací. Při slinování dochází k reakci, při které dochází k tavnému slinování. Při teplotě vyšší jak 1400°C dochází k roztavení kovového pojiva a rozpouští se v něm velké množství karbidů. Plný podíl taveniny tvoří 10 až 50 objemových procent. Může dojít k tomu, že část karbidových zrn, které se nerozpustili v tavenině, má sklon k velkému zvětšování zrna a jejich tvaru, což je nežádoucí proces. Pokud jsou ve směsi karbidů karbidy titanu, tantalumu nebo niobu, dojde při slinování ke změně reakce. Karbidy titanu, tantalum a niobu se navzájem rozpouštějí a částečně poté rozpouštějí také karbid wolframu. Vzniká směsný karbid, který má tvarově odlišné zrna od čistého karbidu wolframu. Současně s procesem, který mění vnitřní strukturu výlisku při slinování, se výrobek smršťuje a mizí pórovitost. Většina slinutých karbidů dosáhne tuhého stavu při teplotě 1300 °C.

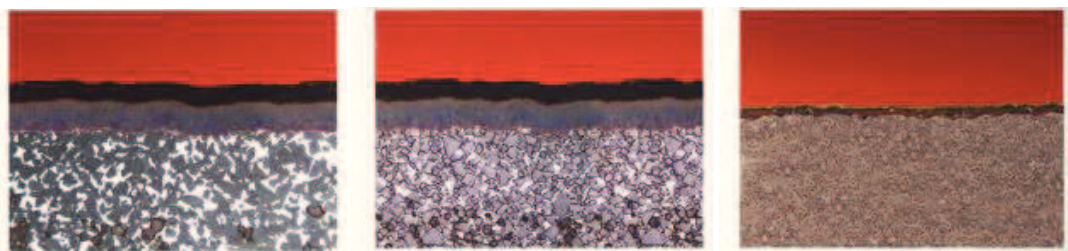
Konečná operace při výrobě polotovarů slinutých karbidů je broušení a to zejména u polotovarů destiček pro frézování. Broušení destiček probíhá na speciálních, plně automatizovaných bruskách za použití řezného oleje. Některé polotovary slinutých karbidů pro výrobu monolitních fréz mají uvnitř výlisku vytvořeny mazací kanálky, buď rovné anebo ve šroubovici. Závěrečnou operací při výrobě nástrojů ze slinutého karbidu je kartáčování. Kartáčováním se stabilizuje (mírně zaoblí) řezná hrana v rozsahu 20 µm až 100 µm.

Destičky slinutých karbidů byly dříve letovány na funkční části obráběcích nástrojů tvrdými pájkami. To bylo pro řadu aplikací omezující podmínkou. Změna nastala v padesátých letech minulého století, kdy se objevují první soustružnické nože s mechanickým upevněním řezné destičky ze slinutého karbidu. Následoval pak vývoj různých utvařečů třísek, způsobů upínání a také povlakování řezných destiček. Pro frézování byl vývoj obdobný. Frézovací nástroje, nejprve s letovanými VBD ze slinutého karbidu, byly nahrazeny mechanickým upevněním VBD. S postupujícím vývojem výroby polotovarů slinutých karbidů a vývojem CNC řízených nástrojových brusek, byl trh nástrojů obohacen o monolitní nástroje ze slinutých karbidů. Tyto nástroje jsou zhotoveny vybroušením z roubíku materiálu na

pětiosých nástrojových bruskách. Vybrušuje se speciálními brusnými kotouči s diamantovou či CBN funkční částí. Bruska je řízena CNC programem. Je to výhodné z důvodu prakticky neomezené variability výroby, kdy lze bez problémů vyrobit jakýkoliv nástroj. Nevýhoda je v poměrně malé produktivitě výroby nástrojů a tedy poměrně vysoké ceně takto vyrobených nástrojů. Určité snížení nákladů na nástroje je možné dosáhnout přebroušováním nástrojů. Nástroje mají po přebroušení stejné geometrické vlastnosti, samozřejmě mimo zmenšení některých rozměrů vlivem opotřebení a následného přebroušení. To však při použití na CNC frézovacích strojích nezpůsobuje omezení, protože menší průměry nástrojů lze v řídicím programu softwarově korigovat. [25].

4.5 Povlakování slinutých karbidů

Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termochemicky stabilního povlaku na bázi oxidů, karbidů, nitridů a jejich kombinací. Používají se vícevrstvé povlaky různého složení a různých tloušťek. Povlaky přispívají ke zvýšení řezivosti řezné hrany.



Obr. 4.13 Povlaku slinutých karbidů ve zvětšených řezech [14]

Zvyšuje se řezná a posuvová rychlost, je možné zvýšit úběr a je zvýšená odolnost při přerušovaném řezu. Důvodem k použití povlakovaných nástrojů je snížení součinitele tření, zamezení ulpívání třísek na čele bříty, zvýšení tvrdosti povrchu při zachování houževnatého jádra, zamezení vzniku nárůstku a zejména zvýšení životnosti nástroje. Povlakováním tak získáváme kvalitativně nové nástroje schopné zajistit vysoký úběr materiál při vysoké posuvové a řezné rychlosti. Nástroje mají zvýšenou odolnost proti rázům při přerušovaném řezu. Povlaků je celá řada. Jsou vytvořeny na bázi TiC , TiN , TiCN , Al_2O_3 a postupným vývojem přichází na trh nové povlaky. Firmy, zabývající se povlakováním, jsou schopné vyvinout povlaky na konkrétní pracovní operace s požadovanými vlastnostmi. Povlakovat je možné také přeastřené nástroje. Je však nutné odstranit staré povlaky. Na odstraňování se používají různé metody. Pro nástroje ze slinutých karbidů se používá šetrná chemická metoda, kdy odstranění povlaků není naleptán povrch slintutého karbidu a nedochází ani k poškození kobaltového pojiva. [14].

4.6 Metody povlakování

Metoda PVD

Název metody PVD vychází z anglického Physikal Vapour Deposition a znamená fyzikální proces povlakování založeném na napařování nebo naprašování pevné látky v řízené atmosféře a tlaku či vakuu. Podmínky, při kterých dochází k procesu napařování, jsou velmi rozdílné a záleží na zpracovávaných materiálech. Fyzikální proces PVD, tvoření tenkých vrstev, je založen na odpařování nebo rozprašování pevné látky nebo chemického prvku a na bombardování povlakovaného předmětu směsí neutrálních atomů, iontů a kondenzací chemických prvků, nebo sloučenin na povrchu předmětu ve vysokém vakuu až 10 Pa. Proces PVD je znám již od roku 1938. Mezi PVD procesy patří:

- vakuové napařování Evaporation,
- katodové rozprašování Sputtering,
- iontové plátování Ion Plating.

Jednotlivé procesy se liší způsobem odpařování pevné látky. Může být tepelné, odporové, vysofrekvenční, plasmové. Způsobem rozprašování se rozděluje na metodu bombardování iontů nebo elektronů, případně elektrickým obloukem. Další rozlišení je dle použitých plynů, jejich tlaku v pracovní komoře, druhem výboje používaným pro ionizaci par a jeho uspořádáním, použitím magnetického nebo elektrického pole. Důležitým společným znakem této metody je poměrně nízká teplota při povlakování, která se pohybuje v rozsahu 300 – 550 °C. Z tohoto důvodu ji považujeme za nízkoteplotní metodu povlakování.

PVD vrstvy lze charakterizovat těmito vlastnostmi:

- otěruvzdornost – často se používá na obráběcích či lisovacích nástrojích pro zvýšení životnosti,
- tepelná vodivost – povrchové vrstvy Al a Cr odolávají vysokým teplotám až 800°C a zároveň tvoří tepelnou bariéru. To je výhodné pro nástroje používané při metodě obrábění HSC, kde je více jak $\frac{3}{4}$ tepla vzniklého při obrábění odváděno třískou,
- odolnost proti korozi – ochrana je závislá na mikroporovitosti vrstvy a na vlastnostech prvků obsažených ve vrstvě,
- snížení třecího odporu – nízký koeficient tření mají povlaky MoS₂, WC/C, DLC (Diamond Like Carbon),
- adheze – poměrně velká přilnavost k podkladu,
- síla nanesené vrstvy – pohybuje se v intervalu od 1 μm do 4 μm,
- mikrotvrdost – závisí samozřejmě na materialu povlaku u materialu DLC je možné dosáhnout až 30 GPa.

Vakuové napařování.

Vakuové napařování je poměrně jednoduchou a také nejvíce rozšířenou metodou PVD. Je založena na kondenzaci par získaných tepelným odpařením materiálu povlaku získaným ve vysokém vakuu. Zdroj odpařování je odporový, zpravidla ve formě košíků, misek nebo lodiček vyrobených z wolframu nebo tantalu do nichž se vkládá napařovaný materiál. Je napájený z nízkonapěťového zdroje s proudem 100 A až 1 000 A. Odporový zdroj je vhodný jen pro materiály s nízkou teplotou odpařování. Pro materiály s vysokou teplotou tavení se používají zdroje s elektronovým paprskem. Výhodou elektronového paprsku je to, že se odpařuje jen čistý materiál neznečištěný podložkou. Konstrukce zdroje zaručuje, že povlakovaný materiál není kontaminován materiálem katody. Čistotu napařování je možné ovlivnit tlakem řízené atmosféry, rychlostí vypařování a také teplotou podložky. Nejrozšířenější je metoda přímého napařování, kdy produkované páry napařovaného materiálu ve vakuu přímo putují na povlakovaný materiál, který není pod elektrickým napětím.

Variantou vakuového napařování je metoda ARE - Activated Reactive Evaporation. Používá na odpařování také elektronový paprsek. Při pracovním cyklu se do komory přivádí reaktivní plyn, metan NH_3 , dusík N_2 , kyslík O_2 při nízkém tlaku. Mezi zdrojem par a povlakovaným materiálem je mřížka s nízkým kladným potenciálem. Mřížka zabezpečuje aktivaci tvorby chemických sloučenin. Povlak je tvořen jako produkt chemické reakce mezi odpařovaným materiálem a reaktivním plynem za přítomnosti plazmy v reakční zóně.

Katodové rozprašování

Při katodovém rozprašování se používá plíživý výboj v plynu na bombardování katody kladnými ionty. Přitom je katoda zdrojem rozprašovaného materiálu. Na anodě je umístěn povlakovaný materiál. V pracovní komoře je vytvořeno vysoké vakuum a do komory se řízeně vpouští inertní plyn, nejčastěji argon Ar. V komoře se potom nastaví řízený pracovní podtlak. Stejnosměrné napětí mezi katodou a anodou je vysoké 1 000 V až 5 000 V. Zdroj napětí musí umožňovat regulaci výboje v plynu a udržovat tak stabilní pracovní podmínky. Kladné ionty, které vznikají v důsledku nárazové ionizace v plíživém výboji, dopadají na katodu a vyraží z ní materiál ve formě atomů.

Při tomto elektrickém výboji není elektrický potenciál mezi elektrodami rozložený rovnoměrně, ale tvoří na straně katody tzv. katodový spád. Hodnota katodového spádu je závislá na druhu plynu a materiálu katody. Principem přenosu je přenos hybnosti z iontu plynu na vyražený atom přenášeného materiálu. Rychlost rozprašování tak roste s atomovou hmotností iontů dopadajících na katodu a liší se pro různé rozprašované látky. Kinetická energie iontů 100 eV až 600 eV překračuje energii vazby atomů v materiálu katody. Během přenosu se však přenášené atomy povlakovaného materiálu mohou srážet s volnými atomy

plynu. To snižuje rychlost atomů, menší množství rozprášeného materiálu a následně zmenšuje adhezi nanášené vrstvy. Pro potlačení tohoto jevu se používá střídavé napětí, kterým se čistí povrch povlakovaného materiálu a katody. Další metodou je přidávání menšího množství kyslíku O_2 , N_2 a čpavku CH_4 . Je možné také použít vysokofrekvenčního napětí, které přináší možnost zvýšení proudové hustoty a umožňuje rozprašovat nevodivé materiály. Poslední variantou je doplnění komory o další pomocnou katodu, která emituje elektrony nezávisle na tlaku plynu. To zvyšuje ionizační účinek a přitom zůstává vysoká proudová hustota. Zlepšuje se adheze povlaku a rovnoměrnost síly povlaku.

Katodové rozprašování vytváří čistější povlakovanou vrstvu. Je možné povlakovat materiály s vysokou teplotou tavení a také slitiny materiálů. Rychlost rozprašování je možné dobře regulovat pomocí proudové hustoty a napětí.

Iontové plátování

Iontové plátování je metoda, vzniklá kombinací metody napařovací a rozprašovací ve vakuu. Touto metodou lze nanášet tenké vrstvy o tloušťkách 1 μm až 25 μm nanášených ve vakuu rychlostí 0,1 $\mu m/min$.

Vrstvy mohou být tvořeny jedním chemickým prvkem, ale třeba také těžkovitělnou slitinou více kovů. Metoda iontového plátování se dělí dále do dvou skupin: na proces odpařování v plazmě, v prostředí nízkého vakua a na zařízení na principu iontového plátování iontovým svazkem.

Podmínka je vysoké vakuum. Tato metoda je někdy označovaná zkratkou IVD Ion Vapour Deposition. Iontové plátování probíhá jako jednoduché odpařování ve vakuu, kde odpařovaný materiál má funkci katody. Katoda se nachází v doutnavém plazmovém výboji udržovaném pomocí stejnosměrného nebo také střídavého vysokofrekvenčního pole. Kladně nabitě ionty inertního plynu jsou v plazmě urychlovány elektrickým polem směrem ke katodě. Ionty dopadající na povrch kontinuálně čistí povrch před povlakováním. Materiál na povlakování je odpařovaný z odpařovacího zdroje, které může být odporový, tepelný zdroj anebo proud elektronů. Atomy odpařené látky se průchodem přes plazmu ionizují a po dopadu na katodu, kterou tvoří povlakovaný předmět, vytvářejí výborně přilnavý povlak. Ionizace inertního plynu a odpařovaného materiálu se zvyšuje přidáním pomocných elektrod. Mohou to také být mřížky. Tím se zvyšuje nejen intenzita ionizace a usměrnění částic v jejich pohybu, ale také proudová hustota na ploše povlakovaného předmětu.

Metoda CVD

Metoda povlakování CVD Chemical Vapour Deposition je chemické povlakování z plynné fáze. Povlak se vytváří na povrchu povlakovaného předmětu chemickou reakcí sloučenin přiváděných do místa reakce v plynné fázi. Základy metody CVD položili van Arkel a de Boer na konci dvacátých let minulého století. Průmyslové rozšíření ale nastalo až v průběhu padesátých let.

Chemické povlakování z plynné fáze je výsledkem souboru chemických reakcí, které probíhají v plynné fázi a na rozhraní plynné a pevné fáze za určitého tlaku, přísunu energie, kde vedle nestabilních produktů vznikají technicky využitelné látky. V případě povlakovaných nástrojů ze slinutého karbidu jde o tvrdé a těžkotavitelné sloučeniny TiC, TiN, TiB, HfN a Al_2O_3 .

Pro získání povlaku karbidu titaničitého se jako reakční látky používá chlorid titaničitý, metan a vodík. Reakční teploty se pohybují v rozmezí 550°C až 1300°C. Pracovní tlak v rozmezí 1 kPa až 100 kPa. Při nižších tlacích je získávána lepší soudržnost povrchu a vyšší čistota povlaku. Vodík zde slouží jako nosný a redukční plyn, který současně brání tepelné disociaci metanu a vylučování volného uhlíku. Rychlost nanášení povlaku je jen málo ovlivněná celkovým množstvím reakčních plynů. Daleko více ji ovlivňuje průběh reakcí na povlakovaném předmětu.

Zpočátku povlakování se na tvorbě povlaku zúčastňuje uhlík a to jak z podkladového materiálu tak z plynné fáze. CVD povlaky se totiž tvoří nukleací – přímým vylučováním krystalů z plynné fáze na povrch povlakovaného předmětu. Vylučování stabilních zárodků, několika atomů, začíná na povrchu s nejnižší energií. Další růst nukleí pokračuje přidáváním atomů jednak z proudu reagujícího plynu, tak z povrchu podložky, na které jsou také zárodky vrstvy. Rychlost růstu povlaku mírně roste s tlakem plynu. Výsledkem CVD procesu jsou dokonalé krystaly povlakované látky o velikosti 20 nm až 200 nm. Povlakování metodou CVD je z termodynamického a chemického hlediska velmi složitý proces. Konkrétní příprava povlaků je součástí složitých technologických postupů dodávaných výrobcem zařízení.

Zařízení pro nanášení povlaku se skládá ze zdroje reakčních plynů, jednotky na čištění plynů a reaktoru s regulací teploty. Dále je součástí zařízení odvod spotřebovaných reakčních plynů s jejich neutralizací, zařízení s regulací pro přívod čerstvých reakčních plynů, neutralizační sprchou a odvodem kondenzátu. Zařízení jsou vyráběna pro určitý druh povlaku, proto se vždy liší.

Poměrně vysoká teplota procesu tvorby povlaku metodou CVD přinesla tlak na vývoj zařízení nízkoteplotních CVD procesů. Postupným vývojem tak vzniká:

- HT-CVD vysokoteplotní CVD teplota procesu 900°C až 1 200°C
- MT-CVD středněteplotní CVD teplota procesu 700°C až 900°C
- P-CVD plazmou aktivované CVD teplota 450°C až 650°C

Nejnovější metodou CVD je ohřev povrchu povlakovaného předmětu laserem. Výhodou této metody je, že se ohřívá jen přesně vymezená část povrchu. Povlak se tak nanáší pouze lokálně. Použití uvedených procesů PVD je doporučeno na různé povlaky.

Povlaky vytvořené metodou CVD se vyznačují nízkou pórovitostí a vysokou adhezí k substrátu. Při tvorbě povlaku je dodržen stechiometrický poměr sloučenin a je rovnoměrně pokryt povrch povlakovaného dílce včetně hlubokých děr a úzkých drážek. Nevýhodou je vyšší teplota nutná pro průběh procesu. Postupně však vývojem dochází ke snižování teplot. Nejvíce rozšířená je metoda MT-CVD, kde se k urychlení reakce plynů používá doutnavý elektrický výboj nebo mikrovlnná plazma. [7].

4.7 Klasifikace slinutých karbidů

Slinuté karbidy se staly nejpoužívanějším materiálem pro výrobu nástrojů na obrábění kovů. Pro nejrůznější aplikace řezných nástrojů byly vyvinuty slinuté karbidy se specifickými vlastnostmi. Aby bylo možné popsat určitý druh slinutého karbidu s všeobecnou platností byl zaveden klasifikační systém ISO 513:2002. V tomto systému jsou pro určité skupiny obráběných materiálů rozříděny případy obrábění v závislosti na namáhání bříty nástroje.

Podle této normy se obráběné materiály dělí do šesti hlavních aplikačních skupin, kde každá skupina se dále dělí na podskupiny. Identifikačními znaky jsou písmena a barva. Pořadí uspořádání v aplikačních skupinách je podle relativního opotřebení a podle pevnosti. Čím je číslo nižší, tím je možné obrábět vyšší rychlostí a nástroj má vyšší otěruvzdornost. Pokud je číslo vyšší roste rychlost posuvu a pevnost řezných materiálů. Rozdělení aplikačních skupin podle normy ISO 513:2002 je následující:

- P modrá barva
- M žlutá barva
- K červená barva
- N zelená barva
- S hnědá barva
- H šedá barva

P - modrá barva označuje nástroje s řeznou hranou vhodnou pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, například ocel, ocelolitinu, korozivzdornou ocel a temperovanou litinu. Slinuté karbidy jsou velmi houževnaté, schopné odolat velkým řezným silám. Jsou však méně odolné proti výmolům na čele nástroje.

M - žlutá barva označuje univerzální nástroje vhodné pro obrábění austenitických korozivzdorných ocelí, žáruvzdorných materiálů, manganových ocelí, legovaných druhů litin. Slinuté karbidy této skupiny jsou houževnaté a odolávají za podmínek středně těžkého hrubování a při přerušovaných řezech.

K - červenou barvou jsou označeny nástroje s řeznou hranou určenou pro obrábění materiálů tvořících krátkou třísku jako jsou šedá litina, kalená ocel. Řezné síly jsou obvykle malé a převládá abrazivní a adhezní opotřebení. Slinuté karbidy této skupiny nejsou vhodné pro materiály tvořící dlouhou třísku zatěžující tepelně čelo bříty.

N - zeleně označené nástroje mají řeznou hranu určenou k obrábění materiálů z neželezných kovů, hliníku, bronzů, různých slitin barevných kovů a také nekovových materiálů.

S - hnědě označené nástroje jsou určeny k obrábění tepelně odolných materiálů, slitin na bázi niklu, železa, kobaltu, titanu a těžce obrobitelných titanových slitin.

H - šedou barvou jsou značeny nástroje s bříty vhodnými k obrábění tvrdých, kalených, tvrzených ocelí a kalených litin. Důležitou vlastností slinutých karbidů této skupiny je odolnost proti opotřebení za vysoké teploty. [12].

4.8 Ostatní nástrojové materiály

Nástrojové oceli, cermety, řezná keramika, syntetické velmi tvrdé materiály.

Nástrojové oceli zařazené mezi ušlechtilé oceli se dle chemického složení dělí na :

- uhlíkové oceli,
- slitinové oceli,
- rychlořezné oceli.

Uhlíkové oceli, které představují nejstarší vývojový stupeň obsahují asi 1,25 % C, malé množství manganu. Se stoupajícím procentem uhlíku roste tvrdost oceli, ale klesá houževnatost. Tvrdost zajišťuje martenzitická struktura. Maximální odolnost proti teplotě je 250 °C. Dnes se z nich vyrábí ruční nástroje, a málo namáhané nástroje.

Slitinové oceli obsahují méně jak 1,25 % C a jsou legovány manganem, chromem, niklem, wolframem a molybdenem. Mají dobrou prokalitelnost, jsou více odolné proti otupení a mají vyšší tvrdost a pevnost za tepla. Jsou určené pro jednoduché nástroje výhrubníky, výstružníky, dřevoobráběcí nástroje a další nástroje, zejména jednodušší, které nejsou určeny pro výkonné obrábění. Odolávají teplotám do 350 °C.

Rychlořezné oceli HSS jsou vysokolegované oceli. Legovány jsou zpravidla wolframem a to až 18%. Mají vysokou řezivost, dobrou pevnost v ohybu, vysokou odolnost proti popouštění a odolávají teplotám okolo 550 °C. Z těchto slitin se zhotovují soustružnické nože, frézy, závitníky, tvarové nože a nástroje na obrábění dřeva. Jsou odolné proti rázům při přerušovaném řezu.

Novou skupinou rychlořezných ocelí jsou oceli zhotovené práškovou metalurgií. Mají výhodu v homogenní struktuře a umožňují takřka neomezené chemické složení. Při slinování mají dobrou rozměrovou stálost. Oceli vykazují výbornou houževnatost i z důvodu lisování, kdy je možné vyrobit vhodné polotovary pro konečný nástroj. Jsou také materiálově a ekonomicky výhodné.

Vysoce čistá tekutá ocel je rozprašována dusíkem, tedy bez přístupu atmosféry, na velmi jemné částičky. Za podmínek extrémně vysokých rychlostí ochlazování, kterým jsou tyto jemné kuličky vystaveny, je jak velikost karbidů, tak i jejich růst výrazně redukován.

Vzniklý prášek padá dolů a je přitom ochlazován, prosíván a ve vakuu plněn do kapslí. Následuje isostatické lisování za tepla (HIP - Hot Isostatic Pressing) při tlaku okolo 1000 bar a teplotě 1200°C. V místech dotyku částic kovového prášku vznikají za těchto podmínek nová spojení a z vysoce čistého kovového prášku tak vzniká produkt s homogenní strukturou a zcela isotropními vlastnostmi. Následné kování a válcování zajistí, že konečný produkt je bez pórů a má velmi jemnou karbidickou strukturu (velikost karbidů cca. 3-5µm). Tyto konečné produkty mohou být ve formě drátů, tyčí, plechů nebo profilů. Nákladné výrobní procesy umožňují v současnosti vyrábět slitiny s obsahem až 3,4% uhlíku a celkovým obsahem legujících prvků až 39%. Potenciál jejich výkonnosti je již srovnatelný s houževnatými druhy slinutých karbidů.

Paralelně s vývojem materiálů se stále vyšší otěruvzdorností, přísadami karbidotvorných prvků, které odolnost proti otěru zvyšují – speciálně vanadu, jsou práškovou metalurgií ve stále větší míře vyráběny i slitiny, které by bylo možno vyrobit konvenční metalurgií. Důvodem jsou i zde zvýšené požadavky výrobců nástrojů.

Homogenní struktura práškových kovů bez makroskopických defektů jako jsou lunkry, struskové vměstky a karbidická hádkovitost, zaručují oproti svým konvenčním protějškům

optimální vlastnosti při třískovém obrábění s vysokými úběry jakož i nejvyšší jakosti povrchu po elektroerozivním obrábění nebo mechanickém leštění.

Objemové změny při tepelném zpracování jsou díky kvaziizotropním vlastnostem struktury ve všech směrech rovnoměrné a pozitivní. Za předpokladu dodržení doporučených parametrů jsou změny tvaru a rozměru tepelně zpracovaného dílce nepatrné.

Nástrojové oceli je možné nízkoteplotními metodami povlakovat a zvyšovat tak jejich užité vlastnosti. [9].

Cermety

Cermety jsou směsné materiály. Jsou kombinací keramiky a kovu. Jejich název vychází z anglického CERamic a METal. Zachovávají vlastnosti keramiky a mají současně houževnatost kovu. Používají se při malých posuvech a vyšších řezných rychlostech.

Řezná keramika

Řezná keramika se dělí na tři základní druhy a to oxidickou, neoxidickou a směsnou keramiku. Představitelem oxidické řezné keramiky jsou materiály na bázi Al_2O_3 , druhou skupinu představuje keramika na bázi nitridů křemíku Si_3N_4 . Řezná keramika odolává vysoké teplotě až 1200°C , její nevýhodou je nižší odolnost proti rázům. Používá se především na soustružnické nástroje.

Syntetické velmi tvrdé materiály

Převyšují otěruvzdorností dosud známé řezné materiály, nejrozšířenější je kubický nitrid bóru KBN. Použití kubického nitridu bóru je především v obrábění tvrdé litiny, návarů s vysokou tvrdostí a stelitů. Při obrábění je možné dosáhnout bez poškození řezné hrany teplot až 1500°C , obráběné plochy mají vysokou jakost povrchu. Pro aplikace, kde nevzniknou vysoké teploty a obráběné materiály nemají afinitu k uhlíku, se používají polykrystalické materiály na bázi diamantu PKD. Použití těchto materiálů limituje ovšem jejich velmi vysoká cena. [12].

4.9 Shrnutí

Kapitola byla věnována řezným nástrojům, teorii obrábění a materiálům s důrazem především na slinuté karbidy. Byly popsány oblasti aplikace a nejvýznamější vlastnosti. Bylo uvedeno rozdělení slinutých karbidů podle normy ISO 513:2002. V dalších odstavcích byly popsány metody nanášení povlaků řezných nástrojů.

5 Opotřebení břitů nástrojů

Opotřebení je naprosto přirozeným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemné vazbě a pohybu. Při obrábění, kdy dochází k vzájemnému kontaktu nástroje a obrobku za současného relativního pohybu nástroj – obrobek a následně nástroj – tříska vždy dojde k opotřebení nástroje. Proces opotřebení obráběcího nástroje je velmi složitý děj závislý na mnoha faktorech, a to na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu a materiálu nástroje, na druhu prováděné operace, na geometrii nástroje, pracovním prostředí a na podmínkách práce. Mechanizmy opotřebení se dělí na :

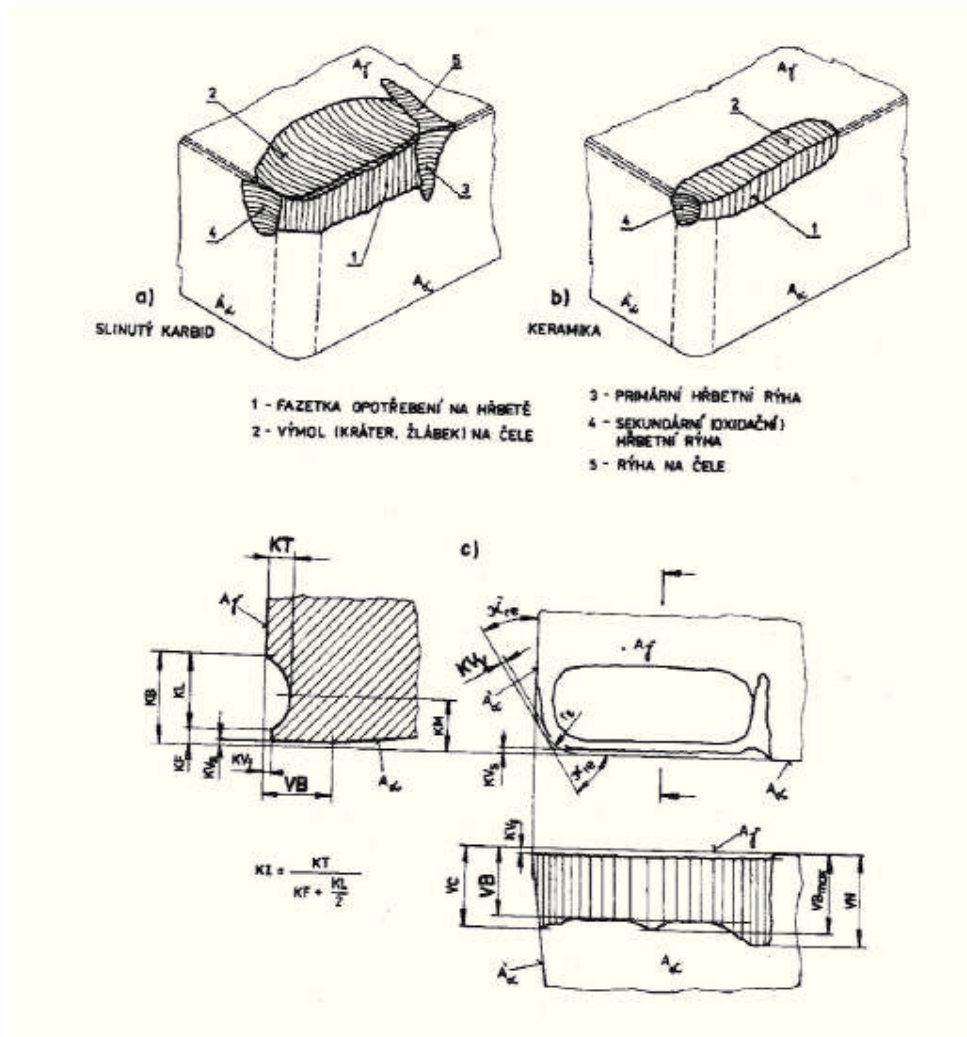
- abrazi - brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic ale i mikročástic uvolněných z nástroje,
- adheze – vznik mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích třísky a čela nástroje a jejich bezprostřední porušení. Vzniká v důsledku vysokých teplot, tlaků, chemické afinity obráběného materiálu a materiálu nástroje,
- difúze – vzájemná migrace atomů z povrchu obráběného materiálu do nástroje a naopak za současného vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje,
- oxidace – degradace povrchu nástroje vznikem chemických sloučenin na základě přítomnosti kyslíku v okolním prostředí,
- plastická deformace – vzniká následkem velkého mechanického termického zatížení kumulovaného v čase. Může se projevit ve formě tzv. lavinovitého opotřebení břítu,
- křehký lom – nastává v důsledku vysokého mechanického zatížení, zejména při přerušovaném řezu, ale také například vlivem nehomogenity a vměstků v obráběném materiálu.

Abrazi a adhezi je možné také označit za fyzikální mechanismus opotřebení břítu nástroje. Difúzi a oxidaci je nutné zařadit k chemickému mechanismu opotřebení. Křehký lom a plastická deformace působí náhle a znamená fatální porušení schopnosti nástroje řezat. Nástroj po křehkém lomu či plastické deformaci, která gradovala v lavinovité opotřebení, musíme vyměnit. Hřbet nástroje se opotřebovává zejména v důsledku abraze a oxidace, čelo nástroje z důvodu adheze, difúze, abraze a oxidace. Na to, zda se bude nástroj více opotřebovávat na čele či hřbetu, mají vliv také další faktory, zejména geometrie nástroje, druh operace a řezné podmínky, které jsou dány řeznou rychlostí, posuvem, hloubkou řezu a použitím procesní kapaliny. Mimo tato opotřebení existují také další mechanismy opotřebení:

- mechanická únava,
- tepelná únava,

- delaminační opotřebení odlupování tenkých vrstev z povrchu nástroje,
- termoelektrické opotřebení,
- rozpouštění materiálu nástroje.

Typický vzhled opotřebení bříty nástroje ze slinutého karbidu se znázorněnými projevy opotřebení je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 5.1 Kritéria hodnocení opotřebení bříty [11]

Opotřebení lze kvantifikovat délkovými charakteristikami, objemem, případně hmotností opotřebovaného materiálu.

VB - šířka opotřebované plochy

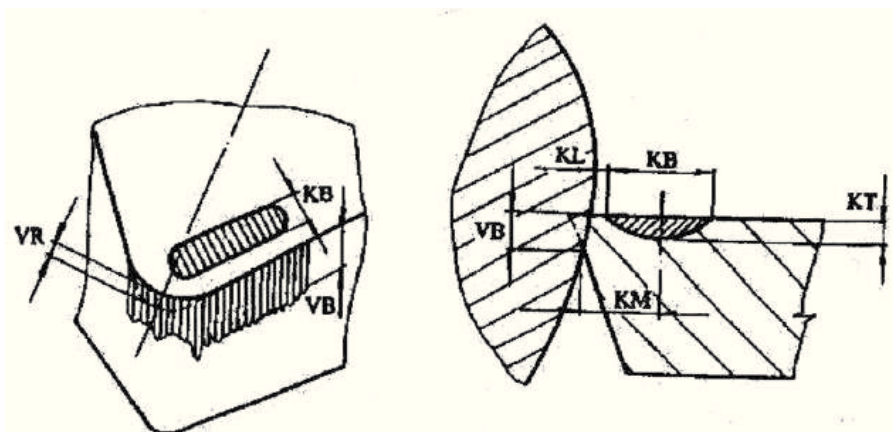
KB - šířka žlábků na čele

KT - hloubka žlábků na čele

KL - vzdálenost ostří k okraji žlábků

KM - vzdálenost ostří ke středu žlábků

VR – radiální otupení



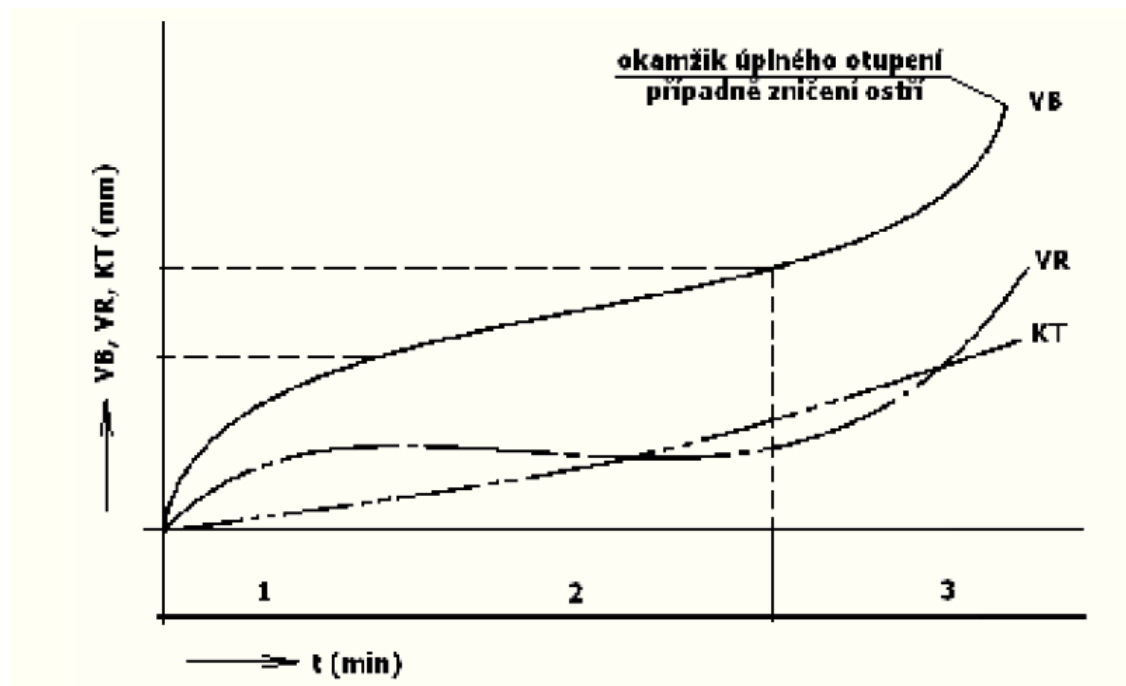
Obr. 5.2 Délkové charakteristiky opotřebení [11]

Důležité je stanovení kritérií pro opotřebení nástroje. Můžeme tedy považovat břit nástroje za opotřeбенý tehdy, když již není schopen dosahovat požadované jakosti povrchu obrobené plochy výrobku. Toto kritérium bude jistě platit pro dokončovací operace. Pokud však bude břit pracovat při hrubovacích operacích, pak dobu trvanlivosti břitu omezíme podmínkou bezpečnosti, tedy dobu trvanlivosti omezíme na dobu, po kterou je břit schopen zajistit kontrolovaný odvod třísky, na dobu, po kterou je nástroj schopen pracovat s dostatečnou rezervou před lomem nástroje.

Pro dosažení vysoké produktivity obrábění je důležitá volba řezného nástroje. Volba materiálu, geometrie, procesní kapaliny či jiného způsobu stabilizace řezného procesu také hraje velkou roli. Důležitou roli, zejména u frézovacích operací, je také volba vhodné strategie obrábění a zejména vhodný CAM software pro daný segment výroby. Bezpečnost práce nástroje právě u dlouhých CNC programů na obráběcích centrech získává na velké důležitosti. Lom nebo jen poškození nástroje v bezobslužném provozu znamená takřka vždy zničení nástrojů v navazujících operacích a v mnoha případech také obrobku. Důležitou roli také hraje potlačení vibrací, které mohou vznikat z důvodu chybného upnutí obrobku či nedostatečné tuhosti nástrojového držáku nebo z jiných příčin v celé soustavě S-O-N.

Pro dosažení optimálních podmínek obrábění je nutné sladit všechny faktory zasahující do řezného procesu, geometrie břitu, řezné podmínky, nástrojové osazení včetně vhodného upínače a procesní kapaliny. V mnoha případech se může projevit synergie všech činitelů a můžeme tak dosáhnout podstatně kratšího strojního času na výrobu součástky.

Na průběhu otupení v závislosti na čase lze určit tři základní charakteristické oblasti.



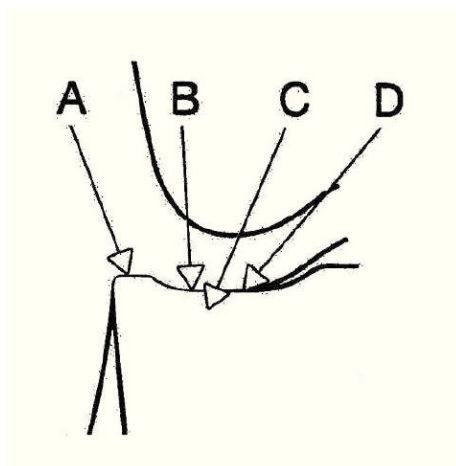
Obr. 5.3 Typický průběh opotřebení [15]

- Oblast 1 - počáteční otupování- ovlivňuje ji srovnání vrcholů a nerovnosti hřbetu nástroje
- Oblast 2 - rovnoměrné otupování – nerovnosti jsou srovnány, průběh je téměř lineární s mírným růstem
- Oblast 3 - zrychlené otupování, může skončit náhlým lomem a zničením bříty

5.1 Typické zóny opotřebení

Opotřebení nástroje je produktem kombinace zatěžujících faktorů působících na břit. Trvanlivost ostří je ovlivňována celou řadou zatížení, která mají snahu změnit geometrii bříty. Opotřebení je interakcí mezi materiálem obrobku, nástrojem a řeznými podmínkami. Hlavní druhy opotřebení jsou:

- A mechanické
- B tepelné
- C chemické
- D abrazivní



Obr. 5.4 Zóny opotřebení řezného břítu [25]

A - Kromě statického a mechanického zatížení zatěžuje břit ještě celá řada různých dynamických zatížení, která se odvíjejí z procesu utváření třísky. A také taková zatížení, která vznikají vlivem nestejných hloubek řezu a přerušovaným řezem.

B - Teplo, které vzniká při obrábění, se tvoří na ploše čela a hřbetu destičky. Toto tepelné zatížení značně namáhá materiál nástroje.

C - Procesem utváření třísek se při vysokém tlaku a teplotě kontinuálně vytváří čistý kovový povrch, který má sklon k chemickým procesům i k procesům difúzním.

D – Tvrdé částice, které jsou v obráběném materiálu, jsou mnohdy stejně tvrdé jak o materiál břítu nástroje. Částice pak vyvolávají abrazivní účinek.

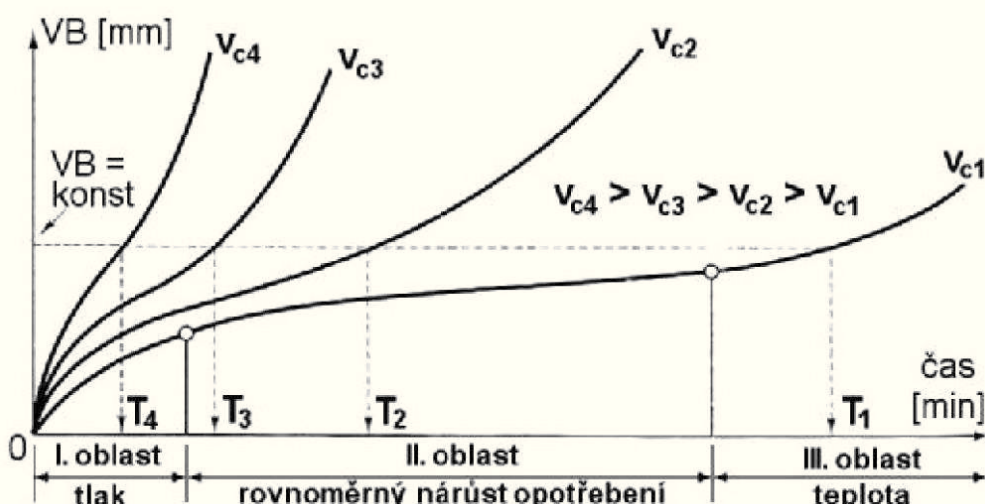
5.2 Klasifikace opotřebení

Kritériem pro hodnocení opotřebení frézovacího nástroje je pro hodnocení vlastností nástrojových držáků vyhodnocovaných v této práci, drsnost obrobeného povrchu. Je důležité, aby se používaný nástroj – tříbřitá válcová fréze ze slinutého karbidu typu F3AU1770BDK38 - pohyboval po celou dobu experimentu jen v první a v druhé oblasti grafu závislosti otupení na čase. Nemí přípustné u frézovacích operací dojít až do okamžiku lomu nástroje. Ten musí vždy pracovat s dostatečnou rezervou trvanlivosti. Jedním důvodem je zamezení lomu nástroje v řezu. V takovém případě, i když nedojde ke zničení dílce, tak v místě lomu zůstávají zbytky nástroje, které mohou zničit nový nástroj. Druhým důvodem je možnost přeastřování frézovacích nástrojů. Pokud úplně nevyčerpáme trvanlivost

frézovacího nástroje a nástroj ukončí operaci bez poškození, můžeme po přeostržení znovu čerpat celou obnovenou trvanlivost nástroje. Hraniční drsnost povrchu stanovíme jako 200% drsnosti výchozí.

Vyhodnocení dat životností nástrojů

Trvanlivost nástroje je důležitou charakteristikou při hodnocení ekonomické stránky procesu řezání. Definice trvanlivosti uváděná v literatuře zní, že trvanlivost je čas po který nástroj pracuje od naostření až do otupení. Životnost je pak suma všech trvanlivostí daného nástroje.



Obr. 5.5 Obecná závislost opotřebení na čase a řezné rychlosti [8]

Pro určení hodnoty trvanlivosti je třeba definovat ještě použitelný stav bříty nástroje, tedy časový interval, kdy jej pokládáme za schopný řezu. Tento stav je možné hodnotit z mnoha hledisek. Jedním je hledisko technologické, které určuje, po jakou dobu je nástroj schopen obrábět danou plochu v požadované jakosti. Další hledisko je ekonomické, kdy se využívá maximální možné míry otupení s malou bezpečností před pásmem lomu bříty. Můžeme použít i kombinaci těchto dvou hledisek. Nástroj využijeme dle prvního hlediska pro obrábění načisto, dokud je schopen dosahovat požadované drsnosti povrchu. Následně nástroj s ještě funkčním břítem použijeme pro hrubování, kde plně využijeme potenciál řezivosti.

Obecná závislost $T_n = f(v_c)$ je uvedena na obr. 5.5. Je to převážně polytropa kterou lze vyjádřit vztahem:

$$T_n = \frac{c_T}{v_c^m} \quad \text{nebo} \quad v_c = \frac{c_v}{T_n^{1/m}} \quad [\text{min}] \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5.1)$$

$$\log T_n = \log c_T - m \cdot \log(v_c) \quad (5.2)$$

Pro každou hodnotu řezné rychlosti přináší jiná hodnota času, po kterou je břit schopen obrábět do optimální hodnoty opotřebení řezného klínu. Metodika vyhodnocení dat životnosti je určena normou ISO 3685.

5.3 Vyhodnocení „by eye“

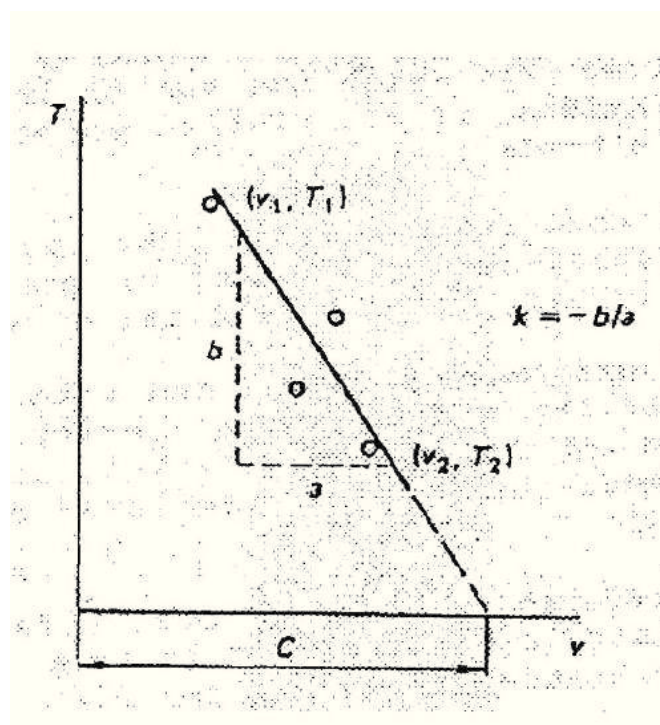
Hodnoty se vynášejí do grafu v logaritmických souřadnicích se stejným měřítkem na obou osách. Trvanlivost T , která je závislá proměnná na vertikální osu a řeznou rychlost v_c která je v tomto případě nezávislá proměnná na horizontální osu. Zakresluje všechny porovnávané hodnoty, vynecháme jen zřetelně chybně naměřené hodnoty. Chyby se nejvíce vyskytují při průměrování naměřených hodnot při jedné řezné rychlosti.

Čára by měla být tažena takovým způsobem, aby součet čtverců vertikálních vzdáleností mezi čarou a aktuálním bodem byl co nejmenší. Konstantu je tak možné získat jednoduše z naklonění výsledné čáry anebo ze dvou pozorování (v_c , T), kterými čára prochází.

$$k = \frac{\log T_2 - \log T_1}{\log v_2 - \log v_1} \quad [-] \quad (5.3)$$

Konstanta C může být odečtena přímo z grafu jako řezná rychlost pro čas 1 minuta, anebo je možné pro výpočet použít vzorce:

$$C = v_1 \cdot T_1^{\frac{1}{k}} \quad [-] \quad (5.4)$$



Obr. 5.6 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [56]

5.4 Vyhodnocení výpočtem

Norma ISO 3685 předepisuje pro vyhodnocování trvanlivosti tři základní druhy výpočtů:

- regresní analýzu,
- statistickou úvahu upravenou na řeznou rychlost pro T křivku,
- limitní interval spolehlivosti pro řeznou rychlost pro T křivku.

Regresní analýza

Regresní analýza patří mezi statistické metody pomáhající sestavit nejlepší čáry k dané množině hodnot místo jednoduchého kreslení čáry používané v metodě by eye. Metoda přímo určuje rovnici čáry, od které je součet rozdílů čtverců, nebo odchylky všech kreslených bodů v jednotlivých směrech minimální. [38].

Tab. 5.1 Tabulka pro výpočet regresní čáry [56]

1	2	3	4	5	6	7	8
číslo měření	v_c [m/min]	T [min]	x	y	xy	x^2	y^2
1							
2							
⋮							
⋮							
n-1							
n							
suma			$\Sigma x =$	$\Sigma y =$	$\Sigma xy =$	$\Sigma x^2 =$	$\Sigma y^2 =$
		$(\Sigma x)^2 =$	$\Sigma x \Sigma y =$				
		$(\Sigma x)^2/n =$	$\Sigma x \Sigma y/n =$				

Předpokládá se, že $\log T$ je lineární funkce nezávisle proměnné $\log v_c$. Odchylky jsou měřeny ve vertikálním směru v $\log T$. Logaritmickou transformací T a v_c do $\log T$ a $\log v_c$ jsou odchylky vypočteny z $\log T$ místo T. Dojde k velmi malému odhadu úrovně čáry. Při výpočtech reálných hodnot je rozdíl trvanlivosti počítaný z T a křivkou počítanou z logaritmu T malý, pokud to porovnáváme z rozptylem hodnot okolo křivky. Pro výpočet plánu lze použít tabulku č. 5.1.

Sloupce č. 2 a 3 tabulky jsou vyplněny naměřenými hodnotami pro všechny změřené výsledky. Je nutné vynechat zjevně chybné naměřené hodnoty.

$$x = \log v_c \quad [-] \quad (5.5)$$

$$y = \log T \quad [-] \quad (5.6)$$

Sloupce 4 a 5 jsou vyplněny jednoduchým zlogaritmováním hodnot T a v_c . Součtem obou sloupců získáme hodnoty $\sum x$ a $\sum y$ průměry hodnoty pak vypočteme dle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad [-] \quad (5.7)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n} \quad [-] \quad (5.8)$$

Transformací Taylorovy rovnice životnosti společně s vhodným výběrem osy získáme následující vztah:

$$y = a + k \cdot (x - \bar{x}) \quad [-] \quad (5.9)$$

ze vztahu vyjádříme a

$$a = k \cdot (\bar{x} - \log C) \quad [-] \quad (5.10)$$

Hodnoty (\bar{x}, \bar{y}) jsou vzdálenosti k bodu těžiště.

Je to nutné k nalezení hodnot C a k . Součet čtverců y je zbytkový. Konstanta k , která je tangentou úhlu mezi regresní přímkou a osou x , je dána vztahem:

$$k = \frac{\sum x \cdot y - \left[\sum x \cdot \frac{\sum y}{n} \right]}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad [-] \quad (5.11)$$

x a y jsou hodnoty uvedené v šestém sloupci tabulky a jejich součet je v sumarizaci. Sumy hodnot x a y jsou ze sloupců 4 a 5, jejich součin je dělen počtem měření n . Sloupec 7 uvádí součet čtverců $\sum x^2$. Ve spodní části tabulky jsou uvedeny $(\sum x)^2$ ze sloupce 4 a na posledním řádku je součet podělen počtem měření n .

Výpočet konstanty C – úseku vyřazené přímkou na ose y vypočítáme z rovnice přímky:

$$\log C = \bar{x} - \frac{\bar{y}}{k} \quad [-] \quad (5.12)$$

Statistická úvaha upravená na V_c T křivku

Disperze hodnot

Dle vzorce vypočítáme směrodatnou odchylku.

$$s_r^2 = \frac{\sum y^2 - \bar{y} \cdot \sum y - k \cdot \left(\sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n} \right)}{n-2} \quad [-] \quad (5.13)$$

Pro výpočet jsou použity hodnoty z tabulky 5.1, výpočet pokračuje zjištěním hodnoty s_r^2 podle uvedeného vzorce. Výpočet pokračuje zjištěním očekávané odchylky, která byla vysvětlená na regresní analýze.

$$s_R^2 = k \cdot \left(\sum xy - \sum x \cdot \sum \frac{y}{n} \right) \quad [-] \quad (5.14)$$

Poměr hodnot s_r^2 a s_R^2

Vybereme nezbytnou hladinu významnosti, třeba 85% a určíme z Fisherovy F tabulky hodnot F pro počet stupňů volnosti rovnající se 1 a n-2. Poměr s_r^2/s_R^2 by měl být vyšší než F hodnota. Pokud tomu tak není, porovnání poměru by mělo být považováno za změnu výsledku.

Limitní interval spolehlivosti pro $v_c - T$ křivku.

Výpočet limitního intervalu pro celou čáru.

Použijeme některé hodnoty získané z tabulky 5.1 hodnoty s_R^2 a s_r^2 z předcházející kapitoly. Vybereme požadovanou hladinu významnosti a ze Studentovy t tabulky určíme dvojstrannou t hodnotu pro počet stupňů volnosti rovnající se n-2 měřením. Interval spolehlivosti pro celou čáru potom vypočítáme dle vztahu:

$$y = \bar{y} + k \cdot (x - \bar{x}) \pm ts_r \sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right)} \quad [-] \quad (5.15)$$

První dva členy rovnice reprezentují regresní přímku, poslední člen je vyjádření velikosti intervalu spolehlivosti.

Intervaly spolehlivosti pro konstanty a, k, C

$$k_m = k \pm \frac{ts_r}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right)}} \quad [-] \quad (5.16)$$

$$a = \bar{y} \pm \frac{ts_r}{\sqrt{n}} \quad [-] \quad (5.17)$$

$$\log C = \bar{x} - \frac{\bar{y}}{k} \quad [-] \quad (5.18)$$

Vyčíslení testů trvanlivosti v jednotlivých rychlostech.

Z pozorovaných n trvanlivostí se střední hodnota \bar{T} vypočítá ze vztahu:

$$\bar{T} = \frac{\sum T}{n} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n} \quad [\text{min}] \quad (5.19)$$

Interval spolehlivosti pro výpočet trvanlivosti

$$T = \bar{T} \pm s \frac{1}{\sqrt{n}} \quad [\text{min}] \quad (5.20)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(T - \bar{T})^2}{n-1}} \quad [-] \quad (5.21)$$

s - značí směrodatnou výběrovou odchylku n pozorovaných hodnot testů

t – studentova t hodnota pro n-1 stupňů volnosti a pro hladinu významnosti $1 - \alpha$ [%]

5.5 Shrnutí

V této kapitole byly popsány procesy opotřebení nástrojů, metodiky hodnocení míry opotřebení řezných hran a zjišťování trvanlivosti nástrojů a teoretický aparát k výpočtu trvanlivosti dle normy ISO 3685:1990.

6 Drsnost povrchu

Jak bylo uvedeno v předcházející kapitole, rozhodujícím kritériem pro rozhodnutí, zda je vyčerpána trvanlivost frézy použité při experimentu, bude dosažení maximální hranice definované drsnosti. Drsnost povrchu bude měřena drsnoměrem Hommel Tester T 1000 se záznamem na termotiskárnu. Na záznamu jsou přehledně uspořádány jak naměřené hodnoty drsnosti, tak grafický záznam profilu povrchu ve velkém měřítku.



Obr. 6.0 Drsnoměr Hommel Tester T 1000.

Jakost obrobeneho povrchu je závislá na celém procesu obrábění, na použitém nástroji, na stupni opotřebení použitého nástroje, na statické a dynamické tuhosti celého systému: stroj – nástroj – obrobek – upínač. Malé nepravidelnosti jsou definovány, jako drsnost R. Tímto označením se rozumí jemné strukturované odchylky od ideálního, tedy přímkového profilu povrchu. Jsou určovány po krátkých úsecích vyhodnocovaných měřicími přístroji. Úseky jsou zpravidla dlouhé 5 mm. Další nepravidelností na obrobených plochách je vlnitost W. Zde je vzdálenost nejvyšších a nejnižších bodů větší než u drsnosti. Testování pro zjišťování vlnitosti musí být prováděno na delším úseku. Drsnost je tak makrogeometricky překryta vlnitostí. Pro stanovení stavu povrchu obrobeného materiálu stanovuje norma ČSN EN ISO4587 tyto geometrické parametry:

- R pro drsnost povrchu
- W pro vlnitost povrchu
- P pro základní profil

Informace o stavu povrchu je získávána profilovou metodou. Norma definuje:

- profil povrchu - průsečnice skutečného povrchu a dané roviny,
- snímaný profil - geometrické místo středů snímacího hrotu o stanovených parametrech,
- referenční profil - dráha, po které se snímač pohybuje,
- základní profil - je úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Je základnou pro digitální zpracování profilu pomocí filtru pro výpočet a hodnocení profilu,
- zbytkový profil - je základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu. Zbytkový profil se skládá z odchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a odchylek vzniklých při přenosu profilu,
- profil drsnosti - je profil odvozený ze základního profilu potlačením složek použitého filtru profilu λ_c . Profil drsnosti je použit pro hodnocení parametrů drsnosti,
- profil vlnitosti – je odvozený profil pro postupnou aplikaci filtru profilu λ_f a filtru λ_c na základní profil.

Důležitým procesem je filtrace, při které se odstraňují nežádoucí složky profilu. Pro oddělování dlouhovlnných složek od krátkovlnných se nazývá mezní vlnová délka filtru cut-off .

Filtry profilu $\lambda_s, \lambda_c, \lambda_f$

- Filtr λ_s definuje rozhraní mezi drsností a krátkovlnnými složkami.
- Filtr λ_c určuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí.
- Filtr λ_f udává rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami přítomnými na povrchu.

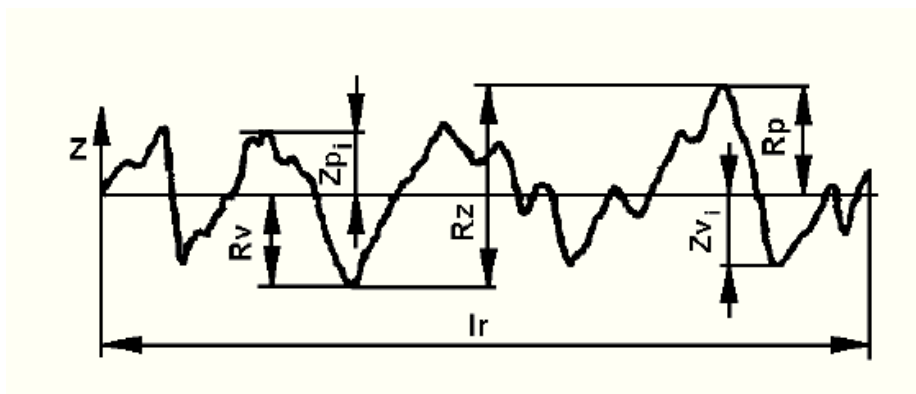
Další důležitou veličinou je základní délka l_r – délka ve směru osy x používaná pro rozpoznání nerovností charakterizujících daný profil. Základní délka l_r je stejná jako hodnota filtru λ_c . Veličina l_n je délka ve směru osy x používaná pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu, ale také více základních délek. [29].

6.1 Parametry drsnosti

Základní pojmy

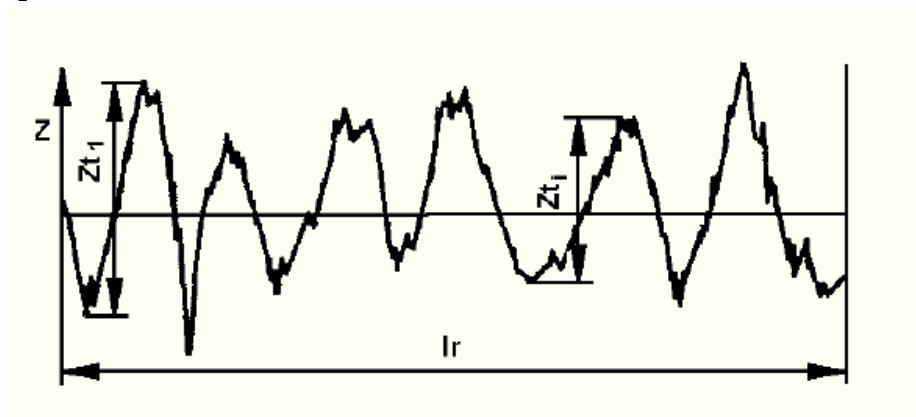
Největší výška výstupku profilu R_p je výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r .

Největší hloubka prohlubně profilu R_v je hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r .

Obr. 6.1 Parametry R_v , R_p , R_z [29]

Průměrná výška profilu R_c je průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky I_r . Pro zjištění průměrné výšky profilu R_c je nutné zadání jedné vertikální a horizontální hladiny řezu. Pro výpočet hodnoty R_c použijeme vztah:

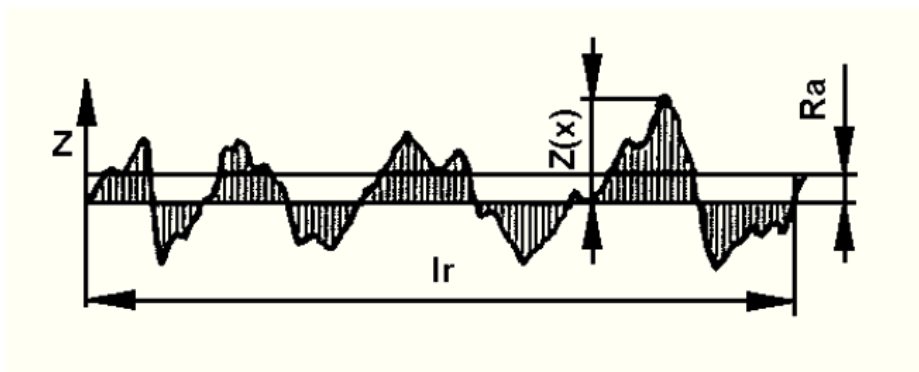
$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad [\mu\text{m}] \quad (6.1)$$

Obr. 6.2 Parametry pro stanovení R_c [29]

Celková výška profilu R_t – je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnížší prohlubně v rozsahu I_r .

Střední aritmetická úchylka profilu R_a – udává aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic $Z_{(x)}$ v rozsahu základní délky I_r . Parametr R_a nereaguje dostatečně na nejvyšší výšky hrotů a hloubky rýh profilu. Je dána vztahem:

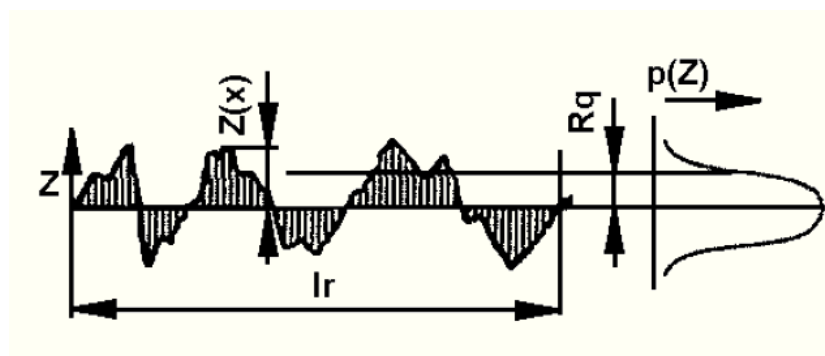
$$R_a = \frac{1}{I_r} \int_0^{I_r} |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (6.2)$$



Obr. 6.3 Parametr Ra [29]

Mezi další parametry pro hodnocení povrchu patří Rq – průměrná kvadratická hodnota souřadnic $Z(x)$ v délce l_r . Je používáný pro statistické pozorování profilu povrchu protože odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic. Je dán vztahem:

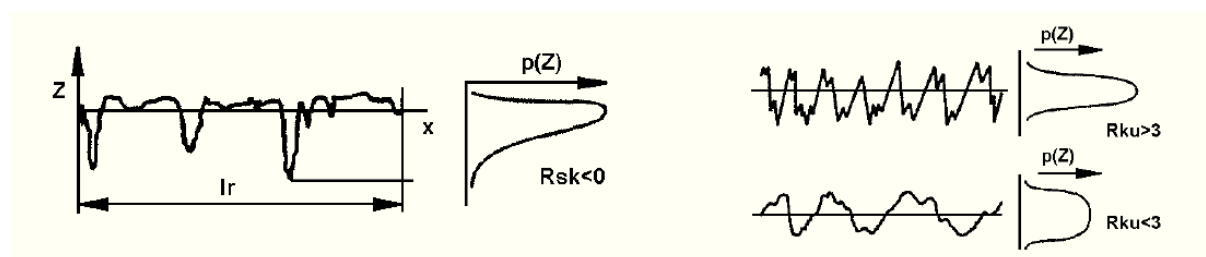
$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad [\mu\text{m}] \quad (6.3)$$



Obr. 6.4 Parametr Rq [29]

Mezi méně frekventované parametry obrobených povrchů patří Rsk – podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq vždy v rozsahu l_r . Dobrým vlastnostem povrchu odpovídá záporná hodnota Rsk .

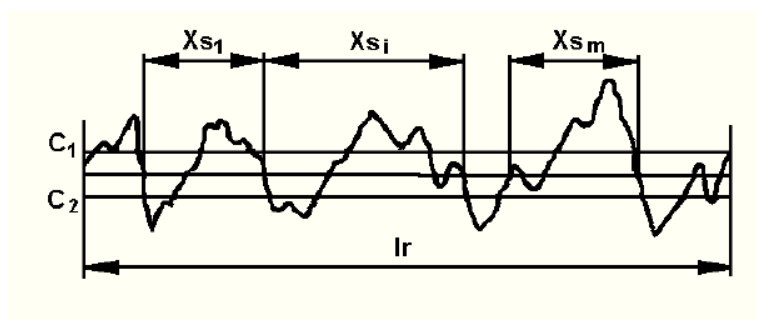
Dalším parametrem jakosti povrchu je špičatost profilu Rku , to je podíl průměrných hodnot čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrtá mocnina hodnoty Rq v délce l_r .



Obr. 6.5 Parametr Rsk a parametr Rku [29]

Délkové parametry jsou hodnoceny průměrnou vzdáleností prvků profilu RS_m . Ta určuje průměrnou hodnotu šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky l_r . Pro vyhodnocení je nutné zadat výšku hladiny řezů C_1 a C_2 . Pro výpočet platí vztah :

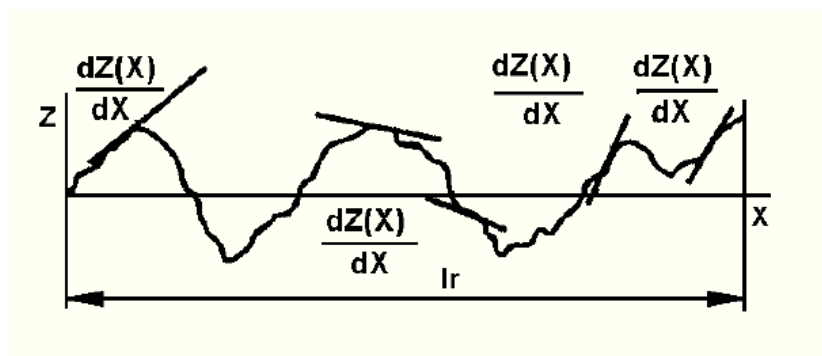
$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad [\mu m] \quad (6.4)$$



Obr. 6.6 Parametr RS_m [29]

Tvarové parametry obrobených povrchů se hodnotí Průměrným kvadratickým sklonem posuzovaného profilu $R\Delta q$. Tento parametr vyhodnocuje průměrnou kvadratickou hodnotu sklonu pořadnic dZ/dX po délce l_r . Uvedený parametr je používán při hodnocení odrazu světla, jakosti galvanického pokovení a tribologických vlastností. Je dán vztahem:

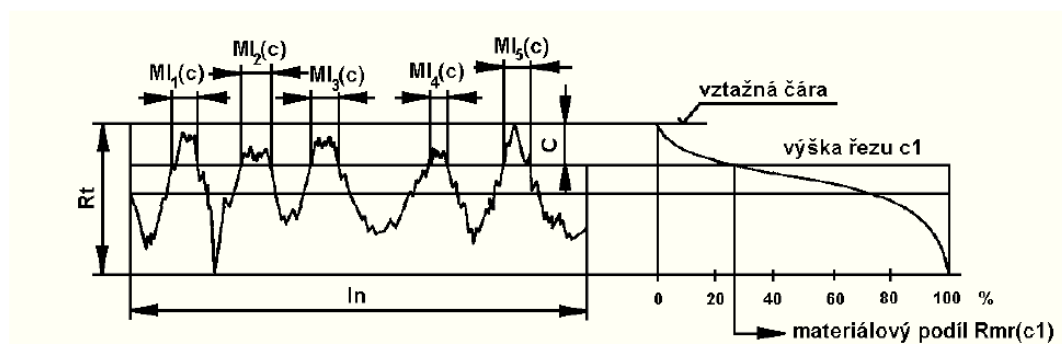
$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} \left(\frac{dZ}{dX} \right)^2 dx} \quad [\mu m] \quad (6.5)$$



Obr. 6.7 Parametr $R\Delta q$ [29]

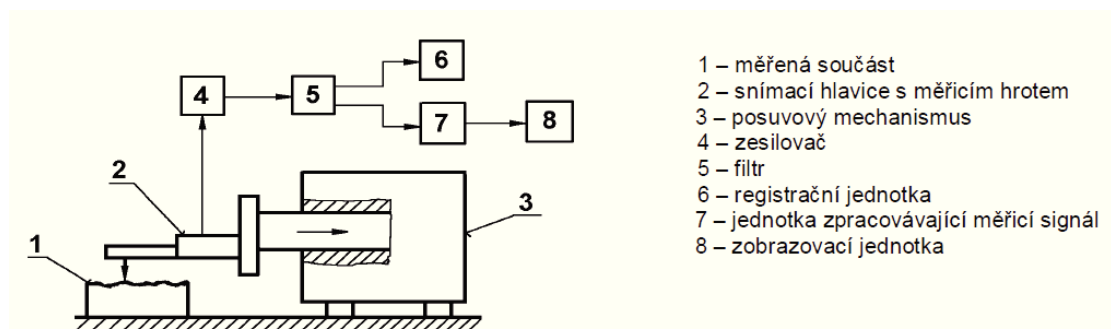
Závěrem uvádím materiálový podíl profilu $Rmr\textcircled{c}$, v průmyslové praxi velmi často hodnocený a uváděný pod názvem nosný podíl. Pro výpočet procentuálního podílu délky materiálu prvků profilu $MI\textcircled{c}$ na dané úrovni c k vyhodnocované délce l_n platí vztah:

$$Rmr(c) = \frac{100}{l_n} \sum_{i=1}^n MI_i(c) = \frac{100 \cdot MI(c)}{l_n} \quad [\%] \quad (6.6)$$

Obr. 6.8 Parametr $Rmr(c)$ [29]

6.2 Měření parametrů drsnosti dotykovými profilometry.

Norma ISO3274 : 1996 uvádí základní charakteristiky dotykových přístrojů pro měření parametrů drsnosti. Uvádí metody vhodné pro objektivní zjištění parametrů povrchu strojních součástí, které lze využít pro moderní statistické a spektrální hodnocení nerovností povrchu. Dotykový profilometr se skládá z mechanické části převádějící nerovnost povrchu na snímač, který je součástí vyhodnocovacího a zobrazovacího elektronického bloku. Blokové schéma na následujícím obrázku.



Obr. 6.9 Princip měření dotykovým profilometrem [29]

Mechanická část přístrojů je tvořena motorickým posuvným přístrojem obsahujícím induktivní snímací přístroj s výměnnou snímací částí, na jejímž konci je snímací hrot. Snímací hrot se pohybuje rovnoměrnou definovanou rychlostí po přímé dráze a dané vzdálenosti. Během posuvu je přitlačen přesně danou silou k povrchu materiálu. Reliéf povrchu je v induktivním nebo také piezoelektrickém, magnetoindukčním či v interferometrickém laserovém převodníku převáděn na elektrický signál.

Elektronická část obsahuje hardwarovou a softwarovou část převádějící příchozí signál na grafický záznam nerovnosti povrchu a provádějící výpočet pro žádané parametry hodnocení obrobeného povrchu. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na displeji přístroje, případně je možné je vytisknout nebo elektronicky odeslat a dále zpracovávat.

Pro správnost výsledků je důležitý bezvadný stav snímačů a parametry snímání, které jsou dané zejména:

- poloměrem zaoblení snímacího hrotu,
- vrcholovým úhlem snímacího hrotu,
- přítláčnou silou měřícího hrotu,
- rychlost změny měřící síly.

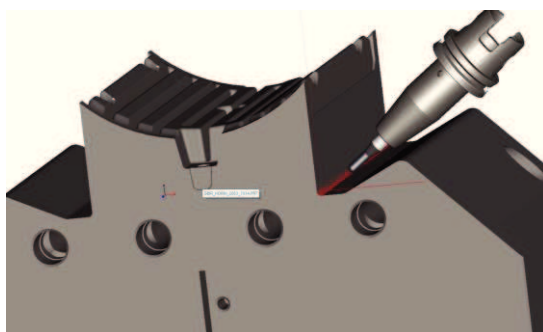
Pro kontrolu a kalibraci přístroje jsou vždy s přístrojem dodávány kontrolní etalony drsnosti. Další používané metody měření jakosti povrchu jsou založeny na využití fyzikálních vlastností světla. Používaná je metoda světelného řezu nebo interference světla. Dnes již historickou, ale sporadicky stále používanou metodou je měření drsnosti povrchu komparací s etalony drsnosti povrchu.

6.3 Shrnutí

V kapitola byly uvedeny metodiky hodnocení jakosti povrchu, parametry jakosti povrchu včetně grafického znázornění měřených a vyhodnocovaných veličin dle normy ISO 3274 : 1996.

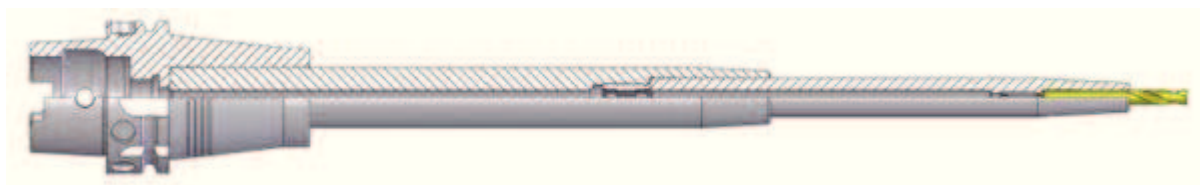
7 Termoupínače a jejich vliv na optimalizaci řezných podmínek

Tvarové plochy, které se vyskytují především na součástech forem pro plastikářský průmysl, nebo na dílcích nástrojů pro lisování plechových dílců či na náročných dílcích leteckého a energetického průmyslu, se v současné době výhradně obrábí na tří a víceosých obráběcích centrech. Pro snížení pracnosti při dokončování dílců a omezení operací ručního dokončování je důležitým požadavkem dosažení co nejhladšího povrchu strojním obráběním. To lze dosáhnout co nejmenším řádkováním paralelních drah nástroje při konečném obrábění načisto. Pro tyto operace se zpravidla používají kulové frézy o poměrně malém pracovním průměru, kterými je třeba obrobit i hluboké tvarové kapsy na obráběných dílcích. Vzniká tak požadavek na štíhlý upínač, mající co nejmenší vnější průměr při spolehlivém a přitom co nejkratším upnutí řezného nástroje. Pro tyto aplikace je termoupínač dobrou volbou.



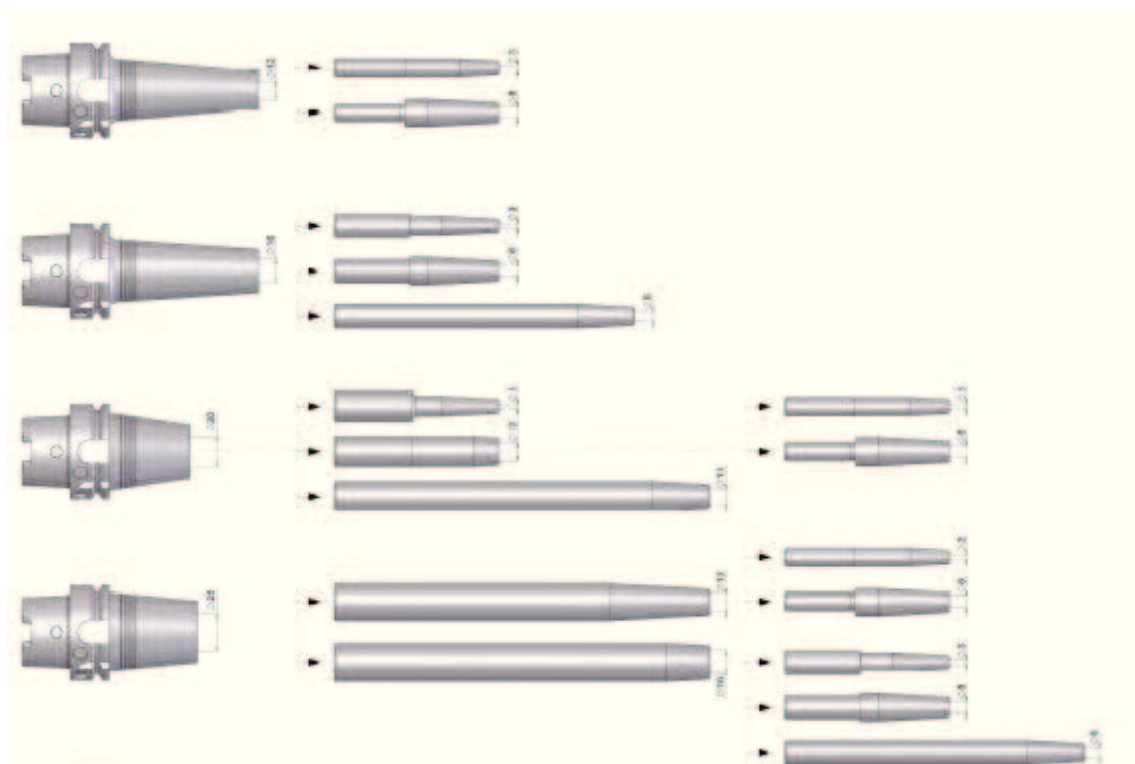
Obr 7.01 Frézování členitého dílce s nakloněnou osou vřetene.

Obrábění rozměrných, třeba i rotačních dílců je limitováno v mnoha případech jejich vlastní velkou hmotností. Taková hmotnost dílců znemožňuje použití vysokých posuvových rychlostí. Proto se posledním desetiletím rozšiřují pro tyto operace portálová obráběcí centra. Obrobky, které mohou mít hmotnost až několik tun, jsou upnuty na pevném stole. U větších strojů je v pracovním prostoru několik upínacích míst, kde se kontrolují hotové dílce, případně upínají nové polotovary. Ve strojním čase probíhají na vedlejším upínacím místě pracovní operace. Všechny pracovní pohyby u těchto strojů vykonává vřeteník stroje. Ten má konstantní hmotnost a z toho důvodu je možné použít vysoké rychlosti posuvů. Na portálových obráběcích centrech se pro ekonomické odebrání velkého množství materiálu frézováním používají metody HSV. Pro upnutí nástrojů tak platí stejné požadavky jako pro HSC a navíc s požadavkem na přenos velkých kroutících momentů.



Obr. 7.02 Extrémě dlouhé nástrojové držáky upnuté v termoupínači [45]

Pro zajištění optimální životnosti a co největší produktivity kulových fréz při obrábění tvarových ploch, jsou tyto stroje vybavovány vřeteníky, které umožňují vyklonění osy rotace nástroje pro eliminaci kontaktu nástroje s obrobkem v oblasti nulové řezné rychlosti. To přináší požadavek na nástrojové držáky se štíhlou upínací částí umožňující dostatečný náklon při frézování tvarových ploch.



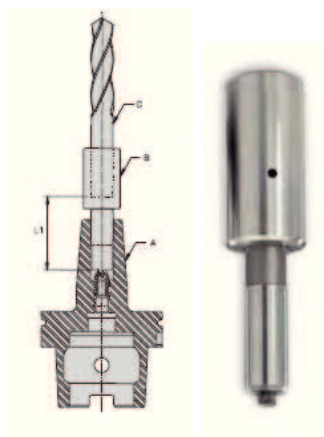
Obr. 7.03 Stavebnice termoupínačů s různými nástavci pro frézování tvarových ploch [45]

Pro obrobky s hlubokými kapsami je nutné stroj vybavit dlouhými nástrojovými držáky s dostatečnou tuhostí, malou házivostí a co nejmenší nevývahou. Případně je vybavit držáky, které lze po upnutí nástroje vyvážit pro maximální snížení zatížení vřetene stroje silami vznikajícími z důvodu nevyváženosti při vysokých provozních otáčkách stroje. Termoupínače, vzhledem ke své velmi jednoduché a symetrické konstrukci, tyto podmínky mohou splnit.

7.1 Manipulace s termoupínači

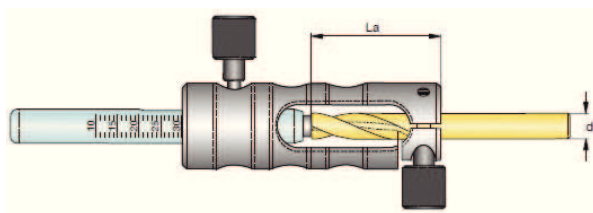
Výměna nástroje v termoupínači probíhá rychlým ohřevem upínací části ve speciálním přístroji pro indukční ohřev. Bezprostředně po ukončení ohřevu je nutné nástroj vyjmout mírným tahem směrem z držáku. Po vyjmutí nástroje je držák ochlazen ve speciální lázni. Při ochlazení je držák současně omyt a zbaven všech ulpělých nečistot.

Po vyjmutí otupeného nástroje je nutné seřídit stavitelný doraz v dutině držáku. Pro nastavení dorazu je vyroben seřizovací přípravek, do kterého se vloží nový nástroj. Celá sestava se v seřizovacím přípravku nebo digitálním výškoměrem změří a potom se nastaví dorazový šroub na přesnou žádanou hodnotu plus délku seřizovacího přípravku.



Obr. 7.04 Sestava držáku se seřizovacím přípravkem, vpravo seřizovací přípravek [45]

Po seřízení a kontrole se z dutiny vyjme nástroj se seřizovacím přípravkem, držák se v indukčním nahřívacím přístroji ohřeje na teplotu 350°C a do dutiny až na opěrný doraz se vloží nový nástroj.



Obr. 7.05 Jiná varianta seřizovacího přípravku [45]

Po několika sekundách je nástroj vlivem chládnutí sevřen tělesem držáku a je možné ho dochladiť v lázni chladícího přístroje či ve volném prostoru. Na následujícím obrázku je v řezu zobrazena zóna ohřevu upínací části tělesa držáku.



Obr 7.06 Řez držákem s upnutým nástrojem [45]

Manipulace probíhá rychle, bez použití síly. Při dodržení všech bezpečnostních instrukcí nehrozí žádné nebezpečí. Protože při výměně nástroje není nutné použít sílu, nemůže dojít k mechanickému poškození upínače ani nástroje. Maximální přenášený krouticí moment je tak dán přesahem průměru nástroje vůči otvoru v upínači a materiálovými konstantami.

$$M_k = T \cdot r_1 \quad [\text{Nm}] \quad (7.1)$$

Kde T je třecí síla, r_1 poloměr upínací části nástroje.

$$T = N \cdot f = p_1 \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot f \quad [\text{N}] \quad (7.2)$$

p_1 tlak ve spoji nástroje a upínače

d průměr upínací stopky nástroje nástroje

l délka zasunutí nástroje do upínače

f součinitel tření mezi nástrojem a upínačem

Tlak ve spoji je dán vztahem:

$$p_1 = \frac{\Delta r_1}{\frac{r_1}{E''} \left[\frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu'' \right] + \frac{r_1}{E'} [1 - \mu']} \quad [\text{N}] \quad (7.3)$$

r_1 poloměr nástroje, r_2 poloměr vnějšího průměru upínače

E' modul pružnosti nástroje, E'' modul pružnosti upínače

μ' Poissonova konstanta pro materiál nástroje, μ'' Poissonova konstanta pro materiál upínače

7.2 Přístroje pro indukční ohřev

Pro ohřev termoupínačů je na trhu celá řada přístrojů. V Evropě jsou nejvíce rozšířeny indukční přístroje pro ohřev firem Schrink, Zoller, Bilz, Diebold a mnoha dalších. Některé přístroje jsou kombinovány zároveň se stanicí na ochlazení nástroje, jiné mají chladicí zařízení jako samostatnou jednotku a u některých výrobců je chlazení integrováno přímo do nahřívacího přístroje.

Konstrukční provedení chlazení je vzduchové a vodní. U vzduchového chlazení se mohou používat například chladicí nástavce vyrobené z hliníku a opatřené chladíci žebry pro zvětšení teplosměnné plochy. Chlazení vodní je u všech výrobců provedeno buď jako komora, do které se držák s nástrojem řízeně ponoří, nebo jako suchá komora která se zaplaví chladicí lázní.

7.3 Fyzikální princip indukčního ohřevu

Ohřev se v těchto přístrojích provádí vířivými proudy, které jsou indukovány elektromagnetickým polem vnikajícím v induktoru. Induktor je cívka, která je napájena střídavým proudem o frekvenci zhruba 10 kHz. Pro správnou funkci je nutné, aby vzdálenost mezi vinutím cívky a ohřívaným materiálem byla co nejmenší.

Účinnost transformace energie je dána vztahem:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left(1 + 6,25 \cdot \frac{\delta^2}{d^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}} \quad [-] \quad (7.4)$$

Kde :

D je průměr induktoru

d je průměr ohřívaného tělesa

δ je hloubka vniku energie

ρ₁ je měrný odpor materiálu induktoru

ρ₂ je měrný odpor materiálu ohřívaného tělesa

μ je poměrná permeabilita

Hloubka vniku vířivých proudů do ohřívaného tělesa je závislá na frekvenci budícího proudu a je dána vztahem:

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \quad [\text{mm}] \quad (7.5)$$

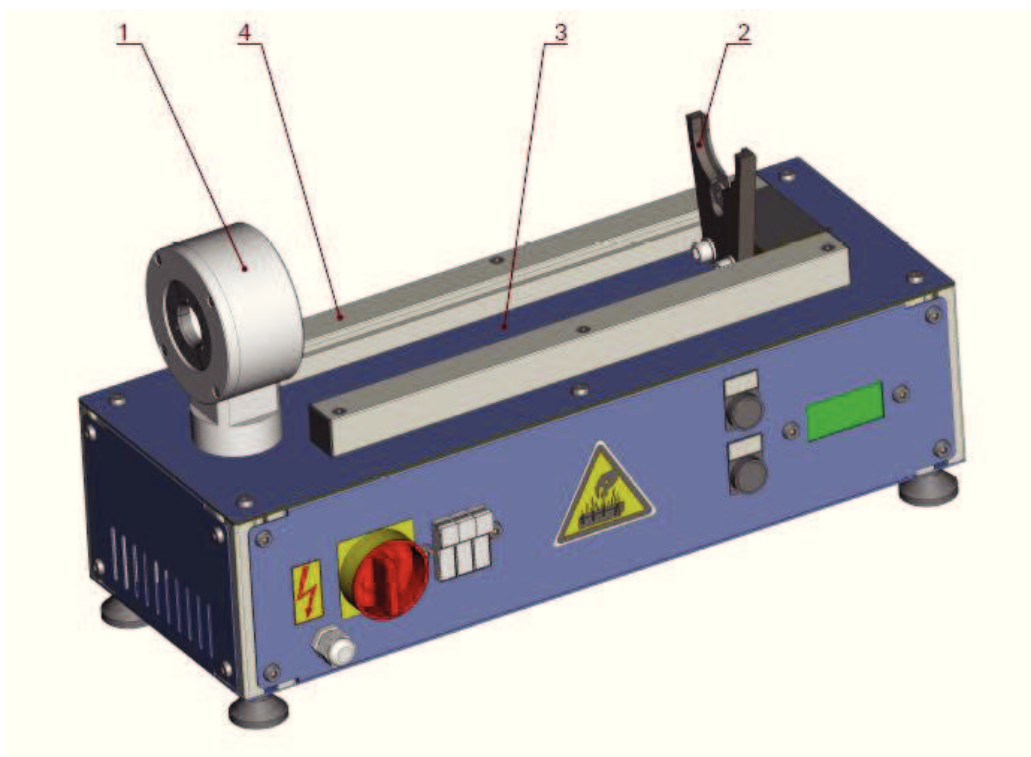
Kde :

ρ měrný odpor $[\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}]$

μ poměrná permeabilita ohřívá $[-]$

Matematický model indukčního ohřevu je velmi složitý. Analytický výpočet elektromagnetického pole a pole teplot je možné vyjádřit soustavou diferenciálních rovnic. V rovnicích se pomocí koeficientů vyjadřují materiálové vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou navíc závislé na teplotě. Obecný výpočet je tak velmi složitý.

Protože bylo nutné pro účely této práce zajistit přístroj pro indukční ohřev, přístroj nebylo možné zapůjčit a cena přístrojů evropských výrobců je příliš velká, rozhodl jsem se, že si přístroj vyrobím.



Obr. 7.07 Návrh výrobně jednoduchého přístroje pro indukční ohřev.

Analýzou požadavků, které budou na přístroj kladeny a na základě poznatků z práce na továrně vyráběných přístrojích, jsem dospěl k jednoduché a univerzální konstrukční koncepci přístroje zobrazené na obr. 7.7. Pro maximální univerzálnost jsem zvolil horizontální provedení přístroje s pevně připevněným induktorem a posuvným držákem nástroje. Jako držák nástroje pozice 2 jsem použil upínací vidličku ze zásobníků obráběcích center. Tu je možné, v případě ohřevu upínačů jiných provedení, jednoduše vyměnit za jinou. Rám přístroje a vodící lišty jsou zhotoveny z Al profilů Bosch pozice 4, jak je uvedeno na obrázku 7.11 s rozloženým přístrojem. Krycí panely pozice 3 jsou vyrobeny z ocelových plechů

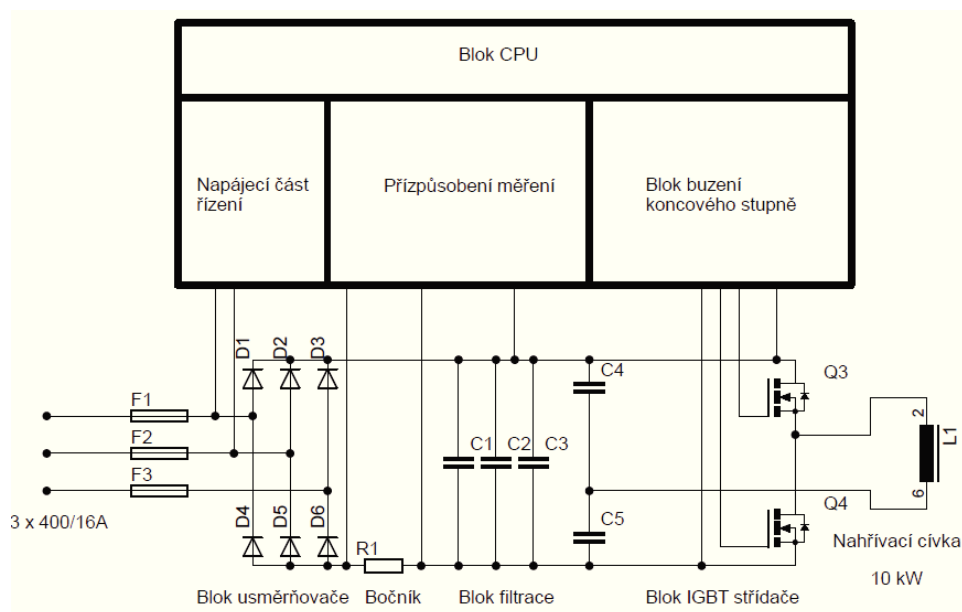
vypálených na CNC laserovém pálicím stroji. Klasickou technologií tak bylo nutné vyrobit jen induktor pozice 1. Ten je tvořen silonovým pouzdrum s držákem připevňující induktor na horní krycí desku, teflonovou kostrou cívky a víčkem s opěrným ocelovým kroužkem vyrobeným z nemagnetické nerezové oceli, jak je zobrazeno na následujícím obrázku. Přístroj dostal označení WNDI a výrobní číslo NN 1-00. Pracovní napětí je 3 x 400V, proud 16 A a výkon max. 11 kW.



Obr. 7.08 Návrh přístroje pro indukční ohřev s rozloženým induktorem.

Induktor, který je z hlediska funkce přístroje stěžejní součástí, je tvořen silonovým pouzdrum pozice 1 s držákem připevňující induktor na horní krycí desku, teflonovou kostrou cívky s vinutím pozice 2, teflonovým víčkem pozice 4 a opěrným ocelovým kroužkem pozice 3 vyrobeným z nemagnetické nerezové oceli, jak je zobrazeno na obrázku č. 7.11. Blok elektroniky byl vyroben ve spolupráci s firmou KTP, je o výkonu 10 KW, pracuje v rezonančním zapojení. Při spuštění zařízení vestavěný procesor řídící chod spínacích IGBT tranzistorů pomocí zpětné vazby z AD převodníků kontroluje napětí a proud na induktoru. Určuje délku otevření IGBT tranzistorů a tím výkon induktoru.

Po sestrojení přístroje a odzkoušení jeho činnosti jsem ve spolupráci s Katedrou Energetiky VŠB provedl měření gradientu teploty na funkčních místech upínače. Vzhledem k velkému nárůstu teploty v čase, je jedinou možností, jak objektivně měřit teplotu, použití termočlánků. Termočlánky nemají žádnou tepelnou setrvačnost, proto při měření rychlých změn teplotního pole poskytují validní výsledky.



Obr. 7.09 Blokové schema zapojení elektroniky indukčního přístroje WNDI.



Obr. 7.10 Termoupínač upravený pro měření teplotního pole.

Na vybraná místa upínacího pouzdra byly kondenzátorovou svářečkou nabodovány termočlánky. Protože jsem kromě gradientu potřeboval změřit také rozložení teplotního pole v závislosti na tloušťce materiálu bylo pouzdro na drátovém řezacím stroji rozřezáno a z vnitřní strany byly obrobena otvory o průměru 6 mm s rovným dnem. Tloušťka materiálu pod dnem byla u prvního otvoru 1 mm, druhého 2 mm a třetího 3 mm. Do otvorů a na povrch upínače byly přivařeny termočlánky typu „K“. Byly provedeny dvě zkoušky, průběh obou zkoušek byl stejný.



Obr. 7.11 Přístroj WNDI během zkoušek gradientu ohřevu.

Při každé zkoušce bylo upínací pouzdro umístěno do nahřívacího zařízení a bylo zahájeno snímání teplot. Po 5 sekundách pak byl spuštěn přístroj WNDI a byly zaznamenávány naměřené teploty. První zkouška trvala 20 sec, druhá 25 sec.

7.4 Měření teploty

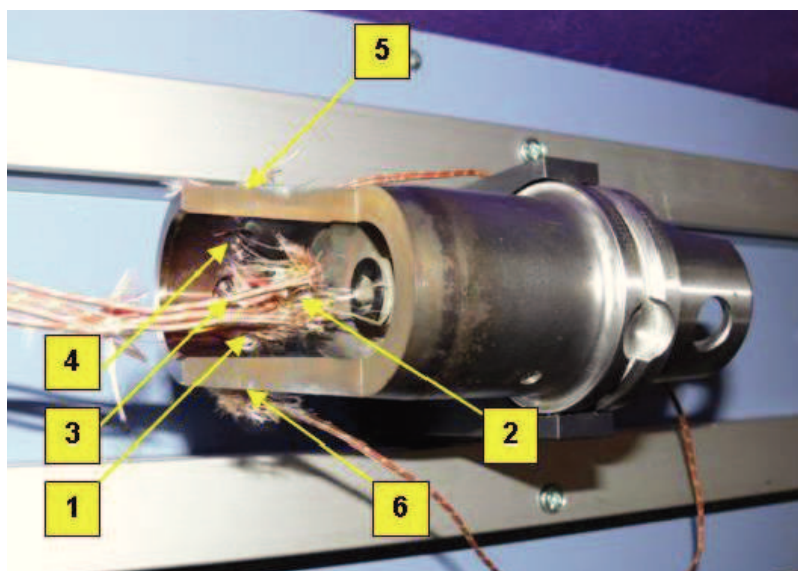
Teploty byly snímány a ukládány systémem Solartron Schlumberger, což je počítačem řízený systém pro teplotní měření v elektrárnách a průmyslu. Měřicí systém Solartron Schlumberger, který byl použit pro měření, je sestaven z počítačové I/O karty „3595 4A“ a externích sběrných karet „IMP 35951“. Měřicí systém vyhovuje normám ISO 2548 a ISO 9001. Komunikace mezi interface kartou 3595 4A umístěné v PC počítači a externími sběrnými kartami IMP 35951 je pomocí S-Net kabelu. Pro komunikaci a zpracování naměřených hodnot je použit software „PMS“. Externí sběrné karty IMP 35951 jsou 16 bitové anologo-digitální převodníky umožňující přesná měření stejnosměrných napětí, proudů a teplot přímo z termočlánků. Tyto sběrné karty umožňují při měření teplot pomocí termočlánků kompenzaci studeného konce termočlánku pomocí zabudovaných termistorů nebo přesného zadání teploty. Chyba použitého měřicího systému při měření teplot pomocí termočlánku „K“ je $< 0,3^{\circ}\text{C}$ v rozsahu -100°C až $+450^{\circ}\text{C}$, $< 1^{\circ}\text{C}$ v rozsahu -200°C až $+1370^{\circ}\text{C}$, což je v souladu s normou IEC 584. Použitý měřicí systém je kalibrován ve státem akreditovaných laboratořích. Měřené teploty byly snímány a zaznamenávány v 1 sekundovém intervalu po dobu cca 60 sec.

Metodika měření teplot a popis měřených míst.

Měření bylo provedeno nabodovanými termočlánky typu „K“ tvořenými termočládkovými dráty Ni a NiCr o průměru 0,3 mm na povrch upínače. Vzdálenost mezi nabodovanými jednotlivými dráty v měřicím místě byla cca 1 – 2 mm. Jednotlivé termočlánky byly připojeny kompenzačním vedením k měřicímu systému Solartron Schlumberger.

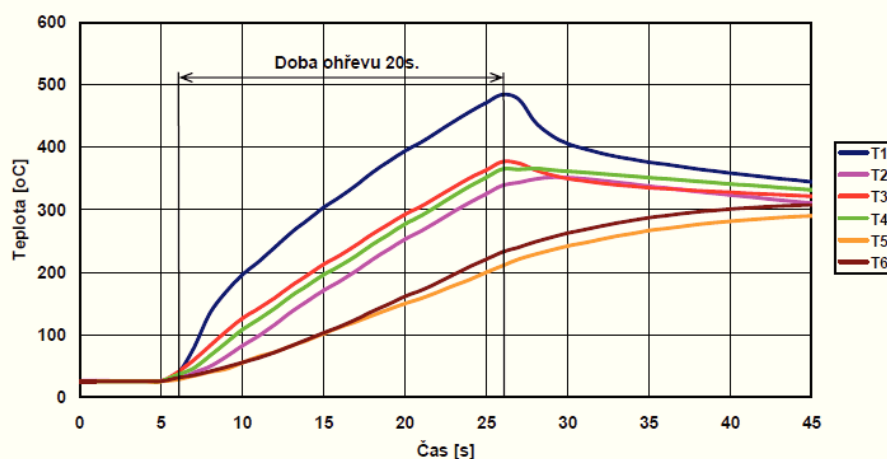
Výsledky zkoušek.

Naměřené teplotní průběhy ohřevu upínacího pouzdra při jednotlivých zkouškách jsou uvedeny v následujících grafech. Rozmístění jednotlivých měřicích míst na upínači je uvedeno na obr. 7.12. Teplo se při indukčním ohřevu tvoří vířivými proudy v povrchové vrstvě materiálu, proto vlastní řez vývin tepla nijak neovlivňuje. Na následujících grafech je zaznamenán průběh teplot při ohřevu upínacího pouzdra. Při vlastním měření byla odřezaná část upínače přiložena na původní místo.

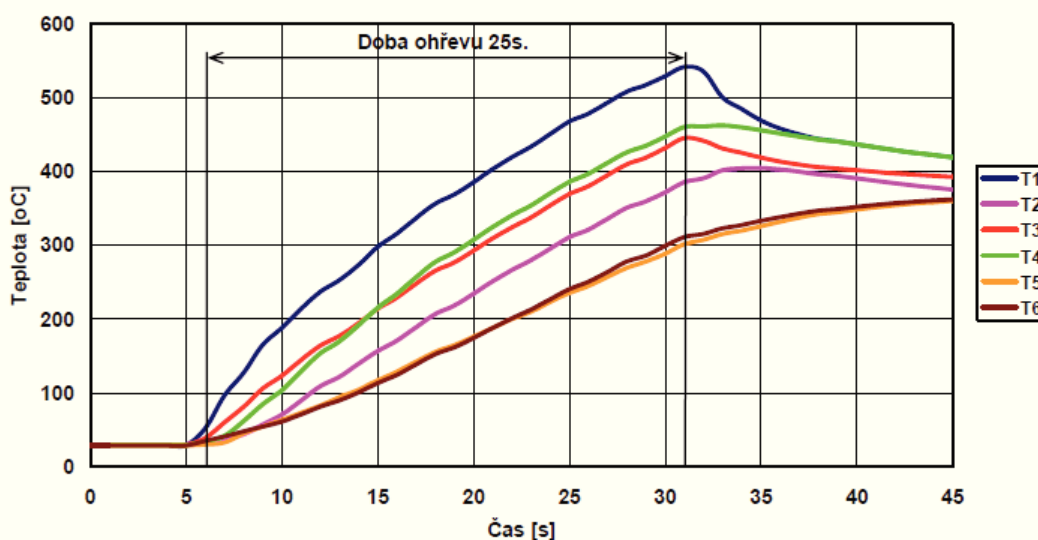


Obr. 7.12 Rozmístění jednotlivých měřicích míst.

Graf 7.1 Průběh teplot při ohřevu upínače, zkouška č. 1, doba ohřevu 20 sec.



Graf 7.2 Průběh teplot při ohřevu upínače, zkouška č. 2, doba ohřevu 25 sec.



Z průběhu nárůstu teploty je patrné, že nárůst teploty je prakticky lineární s gradientem $21^{\circ}\text{C}/\text{sec}$, v povrchové vrstvě upínače a s gradientem $11,1^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ na vnitřní ploše upínače. Rozdíl teplot mezi povrchovou vrstvou a vnitřní plochou je po 25 sekundách ohřevu 250°C . Měření tepelné dilatace vnitřního průměru je komplikované a nelze získat relevantní informace. Děj je velmi rychlý a nelze použít kalibry či dutinoměry, kde hrozí jejich zničení, a nelze spolehlivě odečíst naměřenou hodnotu. Dále, jak je patrné z výše uvedených grafů, je teplotní pole velmi dynamické a jeho rozložení po délce držáků je nesteromické. To je patrné z řezu upínače s nástrojem na obr. 7.9. Proto i naměřená hodnota se musí zákonitě měnit se vzdáleností od konce držáku. Přes tyto omezující podmínky jsem provedl pokus se sestavením měřícího přípravku složeného s ručičkových úchylkoměrů. Byla naměřena dilatace otvoru o $0,12\text{mm}$. Měření ale nelze brát za spolehlivé, protože při ohřevu se upínač vlivem drobných vibrací při indukčním ohřevu mírně pohybuje a měření není validní. Pro hodnocení, zda je indukční přístroj WNDI vhodný pro ohřev upínačů, musíme v tomto případě brát skutečnost, zda je funkční, zda je upínač možné termickou dilatací uvolnit a z upínače lze vyjmout nástroj. To splňuje. Nástroj zhotovený ze slinutého karbidu uvolní spolehlivě do 15 sekund a ohřev pro uvolnění upínače pro zasunutí nástroje trvá obdobnou dobu.

7.5 Shrnutí

Obsahem této kapitoly byla problematika termoupínačů, jejich konstrukce a vhodného použití. Dále byla osvětlena problematika indukčního ohřevu a představeno zařízení vlastní konstrukce pro indukční ohřev upínačů WNDI. Závěrem bylo provedeno měření funkčnosti zařízení.

8 Příprava experimentu

Experimentální stroj FGS 40/50 CNC

Vlastní provádění zkoušek upínačů při frézování materiálu 11 373 bude prováděno na smýkadlové frézce FGS 40/50. Stroj byl vyroben v roce 1986 firmou TOS Olomouc. Frézka je smýkadlové konstrukce, kde základ stroje tvoří masivní odlitek ze šedé litany, po jehož přední straně se svisle pohybuje v ose "z" prostřednictvím kuličkového šroubu a kaleného vedení konzoly stolu. Servomotor pohonu osy "z" je umístěn uvnitř základny stroje, brzda je umístěna na druhém konci šroubu a v případě vypnutí stroje automaticky zabrzdí šroub ve svislém směru pohybu. Pokud je stroj zapnut, polohu stroje zabezpečuje elektronickou vazbou servopohon. V konzole stolu jsou vytvořeny vodící plochy pro vedení stolu v ose "x". V této ose je pohyb konstrukčně uspořádán tak, že na pevném kuličkovém šroubu se otáčí pomocí servopohonu otočná matice axiálně otočně uchycená ke konzole stolu. Výsledkem je pohyb stolu v ose x. Na horní straně základny stroje je vytvořeno vedení pro smýkadlo v ose "y" s vřeteníkem. Pro potlačení nespojitých pohybů při malých posuvech jsou všechny protiplochy vedení obloženy speciálním plastem Turcite B. Smýkadlo se pohybuje pomocí kuličkového šroubu a servopohonu umístěného na zadní straně základny stroje. Ve skříni smýkadla je umístěn motor vřeteníku a převodovka s 18 převodovými stupni, za klidu řazenými elektricky. Na čelní straně smýkadla je příruba na kterou je připevněn vertikální vřeteník s dutinou ISO 50. Vřeteník je možné naklonit o 45° na obě strany.



Obr. 8.1 Frézka FGS 40/50 připravená pro provádění zkoušek

Pokud je potřeba, tak je možné vřeteník pomocí pevně zabudovaného manipulačního přípravku přemístit na zadní stranu smýkadla. Potom je možné využít horizontálního vřeteníku, který je umístěn uvnitř spodní části smýkadla. Po demontáži vřeteníku se totiž automaticky propojí ozubenými koly přívod kroutícího momentu na horizontální vřeteno stroje. Stroj byl původně vybaven řídicím systémem Tesla NS 571 a přímým odměřováním

pomocí lineárních induktosynů. Protože řízení stroje nevyhovovalo současným požadavkům, byl proveden ekonomický retrofit stroje. V rámci mechanické úpravy stroje byly vyměněny opotřeбенé součásti převodovky, všechny kuličkové šrouby byly odeslány na opravu výrobcí a po zpětné montáži byl stroj uveden do funkčního stavu. Původní přímé odměřování polohy bylo nahrazeno lineárními optickými snímači s rozlišením 1 μ m. Pro řízení stroje byl zakoupen nový řídicí systém AJS 131, který je založen na platformě průmyslového PC s operačním systémem Windows.

AJS 131 je elektronický systém určený k řízení obráběcích strojů, vybavených elektrickým řízením pohybu maximálně 6 lineárních nebo rotačních os (případně vřeten).

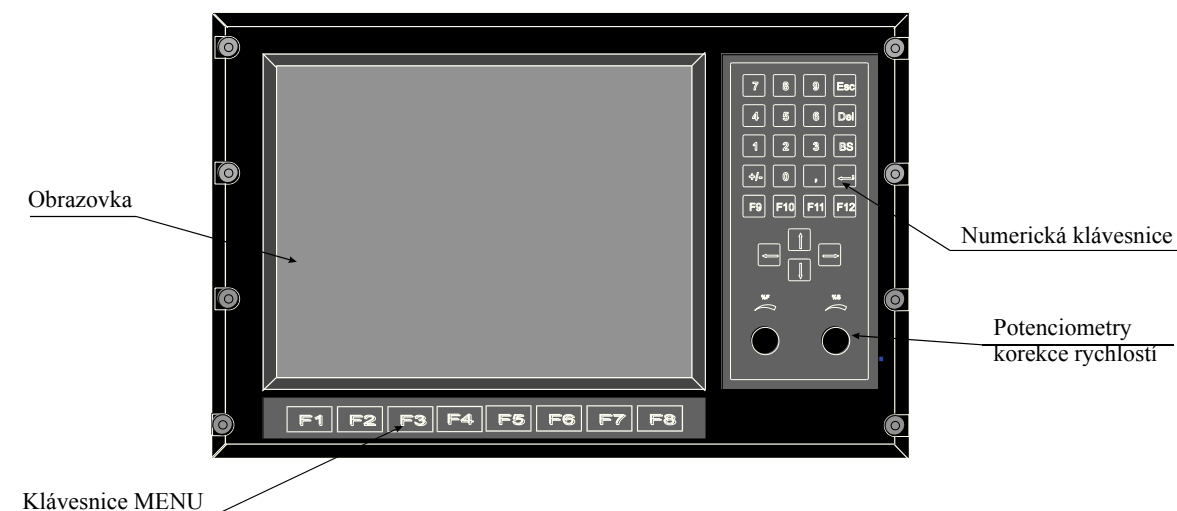
Ovládá elektrické servopohony a další příslušenství obráběcího stroje v závislosti na informacích získaných ze zadaného programu součásti (patrprogramu) nebo z kopírovacího dotyku, což je zařízení vyhodnocující okamžitý tvar snímaného předmětu.

Popis systému AJS 131

Systém se skládá z ovládacího panelu, na kterém je zavěšen elektronický modul a ze vstupních a výstupních přizpůsobovacích modulů pro připojení elektrických obvodů řízeného stroje.

Elektronický modul je uložen v samostatné plechové skříni. Ta je zavěšena na zadní straně zobrazovací jednotky nebo je montována do rozvaděče. Ovládací panel obsahuje barevnou zobrazovací jednotku TFT formátu 12", číslíkovou klávesnici pro edici programů, ovládací knoflíky pro korekci rychlosti posuvu os stroje a klávesnici pro ovládání systému.

Ovládací panel obsahuje vstupy pro připojení strojní klávesnice se strojními tlačítky a indikačními LED diodami, vstup pro externí klávesnici a připojení ručního kolečka pro přímé řízení pohybů stroje.



Obr. 8.2 Obrazovka řídicího systému AJS 131 s ovládacími prvky

Elektronický modul

Obsahuje centrální desku s procesorem Pentium, FLASH diskem (standardně 64MB), pamětí a řadiči displeje a disků. Jednotku řízení servopohonů s odměřováním pro 4 nebo 6 os, 4 nebo 8 analogových 12-ti bitových D/A převodníků a zálohovanou paměť CMOS, jednu nebo dvě jednotky binárních vstupů a výstupů 24V, každou s 96 vstupy a 32 výstupy.

Modul lze doplnit pevným diskem 2,5" (obvykle 10GB). Jádro elektronického modulu, deska průmyslového PC s integrovanými ovladači zobrazovací jednotky, FDD, HDD, klávesnice a sériovými a síťovým rozhraním je s dalšími elektronickými moduly propojeno průmyslovou sběrnicí PC104.

Binární vstupy a výstupy jsou prostřednictvím externích modulů připojeny na desku elektronického modulu, která zajišťuje jejich přizpůsobení a galvanické oddělení od ostatních obvodů. Binární vstupy a výstupy pracují s úrovněmi 0 / 24 V.

Deska umožňuje připojení až 32 logických výstupů a až 96 logických vstupů. V případě potřeby je možno použít tyto desky dvě a zvýšit tak počet výstupů na 64 a vstupů na 192.

Servopohony.

Poslední elektronická deska obsahuje specializovaný obvod pro snímání polohy pomocí 4 nebo 6-ti inkrementálních snímačů IRC nebo ILC. 8 analogových 12-ti bitových převodníků pro řízení servopohonů analogovým napětím $\pm 10V$, obvody připojení ručního kolečka a zálohovanou paměť CMOS o kapacitě 128 kByte. Na stroji byly ponechány původí stejnosměrné pohony os a asynchronní motor pohonu vřetene.



Obr. 8.3 Měnič motoru vřetene se zapojeným ampérmetrem a voltmetrem pro měření příkonu vřetene

Pro snížení proudového nárazu při spouštění motoru vřeteníku bylo ovládání motoru vybaveno frekvenčním čtyřkvadrantovým měničem kmitočtu. Je možné tak nastavit přes

řídící systém libovolné otáčky vřetena. Vlivem nastavení pozvolné rozběhové rampy motor zatěžuje síť při rozběhu pouze 8 A místo původních 40 A.



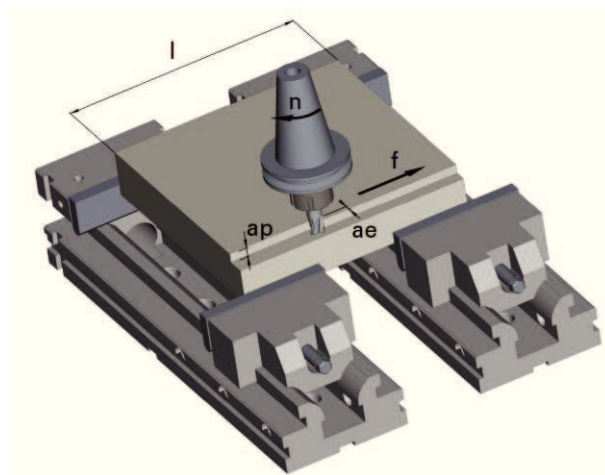
Obr. 8.4 Ovládací panel stroje FGS 40/50 s ručními kolečky os x, y, z

Pro snadné ovládání při experimentech, ale také při variabilní výrobě byl stroj ovládacím panelem se samostatnými kolečky pro každou osu. Pomocí nového řídicího systému stroj lze ovládat ve třech základních režimech.

- Ruční režim s elektrickým řazením otáček, ovládání posuvu ručními kolečky. Otáčky se nastavují elektronicky potenciometrem. Stroj navenek funguje jako klasicky řízená frézka ovládaná ručními kolečky. Na obrazovce řídicího systému jsou zobrazeny polohy souřadnic, které lze libovolně nulovat nebo přepisovat, a otáčky vřetene.
- Ruční režim s elektrickým řazením otáček, ovládání posuvu směrovými tlačítky, otáčky a posuvy se nastavují elektronicky - potenciometry. Stroj navenek funguje jako klasicky řízená frézka ovládaná pomocí strojních posuvů. Na obrazovce řídicího systému jsou zobrazeny polohy souřadnic, velikost posuvu a otáčky vřetene.
- Plně automatický režim. Stroj je řízen CNC systémem dle programu. Stroj se programuje pomocí normovaných G kódů. Paměť řídicího systému je dimenzována až pro programy o velikosti 10 GB. Stroj je možné s výhodou programovat pomocí CAM software. Vzhledem k rozsáhlé paměti je možné zpracovávat i velmi dlouhé programy. Stroj není vybaven zásobníkem nástrojů, výměnu nástrojů je nutné provádět ručně.

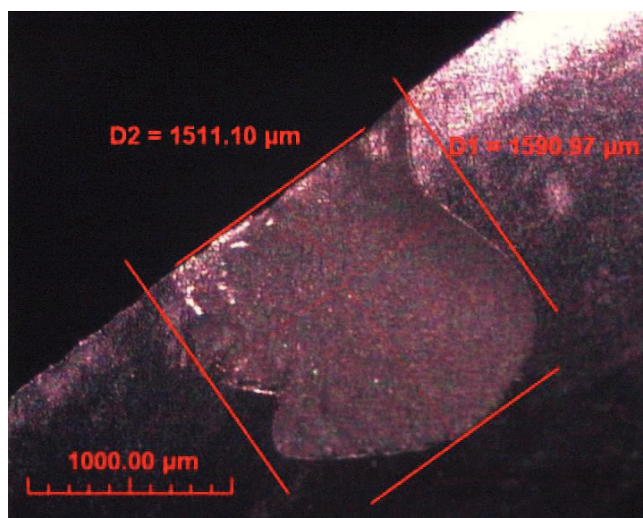
8.1 Příprava materiálu

Jak bylo uvedeno v předcházející kapitole, stroj je plně vybaven pro provedení experimentů. Během zkoušek nebude použita procesní kapalina. Vlastní provádění prvního experimentu bude prováděno frézováním osazení do bloku materiálu jakosti 11 523.



Obr. 8.5 Náčrt materiálu upnutého ve svěrácích na stole frézky

Původně uvažované frézování drážek nebude prováděno. Důvodem je, že v praxi se frézování drážek provádí pomocí trajektorií postupného rozjíždění nebo různých obráběcích cyklů, kdy nástrojem o menším průměru se postupně do hloubky a do stran obrábí stěny drážek. Pokud se drážka obrábí najednou na celý průřez stopkovou frézou a nejsou přitom intenzivně vysokým tlakem odplavovány vznikající třísky, dochází u nástrojů ze slinutých karbidů při vtažení již odřezané třísky mezi břit a stěnu k lomu řezné hrany a následným defektům obrobené plochy.



Obr. 8.6 Fotografie lomu břitu frézy způsobeném vtažením již odřezané třísky mezi břit a frézovaný materiál

Takovou plochu by nebylo možné objektivně hodnotit a docházelo by ke zkreslení výsledků experimentu.

Vlastnosti upínačů se budou testovat za použití tříbřitých fréz Kennametal F3AU177BDK38, materiál nástroje je slinutý karbid KC643M s PVD povlakem TiAlN. V tabulce 8.1 uvedené na následující straně jsou uvedeny výrobcem doporučené řezné podmínky. Upínače budou testovány při sousledném a nesousledném frézování, mimo jakost povrchu budou také sledovány vibrace obrobku a trajektorie odlétajících třísek.

Tab. 8.1 Výrobcem nástroje doporučené řezné podmínky [45]

F3AU...A/BDK30...

Group	Application			Vc KC635M m/min	Recommended fz- Feed Per Tooth (mm/th) for side cutting operations. For slotting operations, reduce fz by 20%. D1 - Diameter (mm)									
	Side Milling		Slotting											
	ap	ae	ap		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
P2	1XD	0.5XD	0.5XD	140	0,015	0,020	0,040	0,045	0,060	0,070	0,075	0,080	0,090	0,100
P3	1XD	0.5XD	0.5XD	120	0,015	0,020	0,040	0,045	0,060	0,070	0,075	0,080	0,090	0,100
P4	1XD	0.5XD	0.5XD	105	0,015	0,020	0,040	0,045	0,060	0,070	0,075	0,080	0,090	0,100
P5	1XD	0.5XD	0.5XD	80	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
P6	1XD	0.5XD	0.5XD	80	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
M1	1XD	0.5XD	0.5XD	100	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
M2	1XD	0.5XD	0.5XD	80	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
M3	1XD	0.5XD	0.5XD	75	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
K1	1XD	0.5XD	0.5XD	200	0,015	0,020	0,040	0,045	0,060	0,070	0,075	0,080	0,090	0,100
K2	1XD	0.5XD	0.5XD	180	0,015	0,020	0,040	0,045	0,060	0,070	0,075	0,080	0,090	0,100
N1	1XD	0.5XD	0.5XD	780	0,020	0,040	0,060	0,075	0,100	0,110	0,120	0,145	0,150	0,160
N2	1XD	0.5XD	0.5XD	720	0,020	0,040	0,060	0,075	0,100	0,110	0,120	0,145	0,150	0,160
S1	1XD	0.5XD	0.5XD	80	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
S2	1XD	0.5XD	0.5XD	75	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
S3	1XD	0.5XD	0.5XD	70	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085
S4	1XD	0.5XD	0.5XD	75	0,010	0,020	0,030	0,035	0,050	0,057	0,065	0,070	0,075	0,085

Legenda:

Reduce speed by 20% for slotting applications - Snižte rychlost o 20%, pro drážkování

Application - Aplikace, Side Milling- Boční frézování, Slotting - Svislé frézování

Recommended fz Feed Per Tooth for side cutting operations - Doporučený posuv na zub pro boční řezání operace

For slotting operations, reduce fz by 20% - Pro drážkování, snížení fz o 20%

Z tabulky volíme pro obráběný materiál 11 523 řezné podmínky skupinu S1. Průměr funkční části frézy je 17,7 mm, 3 zuby, průměr stopky je 18 mm, hloubka řezu a_p 12 mm. Hloubka je volena pro snadné měření drsnosti povrchu přístrojem Hommel Tester T 1000. Úběr a_e volíme 3 mm, dle tabulky by mohl být 0,5 x D to je 8,85 mm. Řezná rychlost doporučená výrobcem je 80 m/min. Z toho vyplývají otáčky 1439 ot/min. Protože nebude použita procesní kapalina, redukuje otáčky na 1 000 ot/min. Tabulka uvádí posuv na zub a otáčku 0,075

mm tomu odpovídá posuv 225 mm/min. Pro provádění experimentu volíme tedy tyto parametry řezného procesu:

- a_p 12 mm
- a_e 3 mm
- f 225 mm.min⁻¹, pro f_z 0,075 mm.zub⁻¹
- n 1 000 ot.min⁻¹
- l 300 mm

Z důvodu zajištění reprodukovatelných podmínek pro frézování bude při frézování osazení na hranolu materiálu použit jednoduchý CNC program, kterým po stisknutí tlačítka obrobíme jednu vrstvu materiálu. Po dokončení obrábění bude vřeteník a stůl ustaven do vhodné polohy tak, aby bylo možné provést všechna potřebná měření. Programy budou vytvořeny tak, aby nejdříve bylo provedeno 10 pracovních cyklů pro sousledné frézování a 10 cyklů nesousledné frézování.



Obr. 8.7 Fotografie stroje při měření házivosti upnutého nástroje a drsnosti obrobeného povrchu

Z důvodu snadné obsluhy a nastavení úběru budou programy napsány inkrementálně. To zabezpečí, že při každém dalším stisknutí tlačítka start bude automaticky odebrán další naprogramovaný úběr materiálu.

Program pro sousledné frézování

```
G91 G95 G54 G41  
S 1000 M3 D1  
G0 Z-100  
G01 X-340 F225  
M5  
G0 Z100  
X340 Y-3  
M30
```

Program pro nesousledné frézování

```
G91 G95 G54 G41  
S 1000 M3 D1  
G0 Z-100  
G01 X340 F225  
M5  
G0 Z100  
X-340 Y-3  
M30
```

Funkce řídicího programu. Po stisknutí tlačítka start se nastaví inkrementální způsob načítání souřadnic, posunutí souřadného systému a načítání korekcí. Na dalším řádku se spustí otáčky vřetene a zařadí korekce nástroje. Poté nástroj přijede z výchozí polohy ve svislém směru k materiálu. Pracovním posuvem odfrézuje jednu vrstvu materiálu, zastaví vřeteno a odjede o 100 mm od materiálu v ose z. Přejede na začátek materiálu a současně nastaví přídavek a_e . Chod programu je přerušen do dalšího stisknutí tlačítka start. Výška úběru materiálu a_p je dána prvotním nastavením vřeteníku pomocí ručních koleček a posunutí souřadného systému stroje v ose z. Během úběru v jedné vrstvě se nemění.

8.4 Příprava pro frézování kruhovou interpolací

Zkoušky upínačů při práci za podmínek kruhové interpolace v rovině xz budou prováděny na přířezu materiálu 11 573 upnutého na stole frézky. Pro zjednodušení upnutí poměrně hmotného obrobku o průměru 260 mm a výšce 120 mm byl materiál ve své dolní části přivařen na ocelovou desku o hraně 300 mm a tloušťce 30 mm. Takto vzniklý svařenec bylo možné jednoduše pomocí upínek připevnit ke stolu stroje. Svárem tepelně ovlivněná oblast byla daleko od obráběné části a žádným způsobem provádění experimentu neovlivnila. Neměla ani negativní vliv na tuhost soustavy: stroj – nástroj- obrobek.

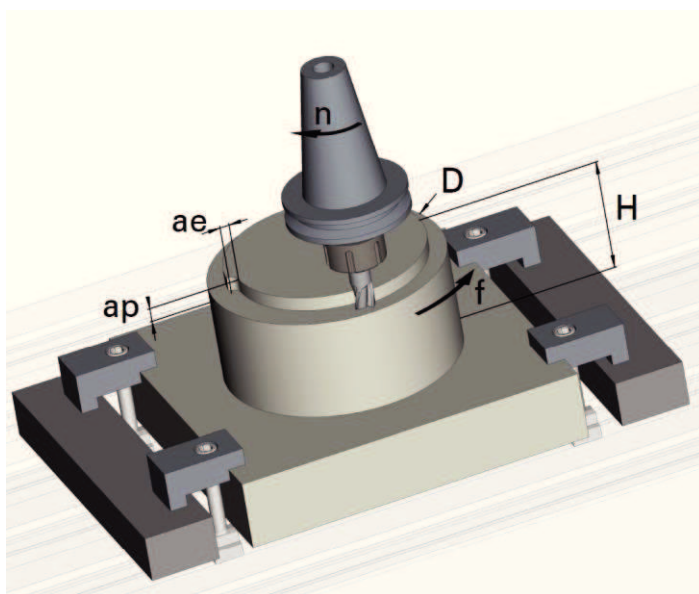
Program pro sousledné frézování

```
G90 G95 G54 G41  
S 1000 M3 D1  
G0 X100 Y76,15  
G0 Z0  
G0 X30  
G01 X0 F225  
G02 X0 Y76,15 I0 J-76,15  
G0 Z100  
G0 X100  
M5  
M30
```

Program pro nesousledné frézování

```
N10 G90 G95 G54 G41  
N20 S 1000 M3 D1  
N30 G0 X100 Y76,15  
N40 G0 Z0  
N50 G0 X30  
N60 G01 X0 F225  
N70 G03 X0 Y76,15 I0 J-76,15  
N80 G0 Z100  
N90 G0 X100  
N100 M5  
N110 M30
```

Po změření drsnosti obrobeného povrchu a kontrole nástroje se na řádce 30, 70 odečte hodnota a_e od proměnných Y a absolutní hodnoty J. Program se uloží do paměti stroje a znovu se spustí. Obdobný postup se provede při sousledném frézování.



Obr. 8.8 Sestava při nesousledném úběru materiálu kruhovou interpolací.

Z tabulky řezných podmínek opět volíme řezné podmínky pro obráběný materiál 11 523. Průměr funkční části frézy je 17,7 mm, 3 zuby, průměr stopky je 18 mm, hloubka řezu a_p 12 mm. Úběr a_e volíme 3 mm. Řezná rychlost doporučená výrobcem je 80 m/min. Z toho vyplývají otáčky 1439 ot/min. Z důvodu frézování bez procesní kapaliny redukuje na 1 000 ot/min. Tabulka uvádí posuv f_z na zub a otáčku 0,075 mm, tomu odpovídá posuv 225 mm/min. Pro provádění experimentu volíme tedy tyto parametry řezného procesu:

- a_p 12 mm
- a_e 3 mm
- f 225 mm.min⁻¹, pro f_z 0,075 mm.zub⁻¹
- n 1 000 ot.min⁻¹

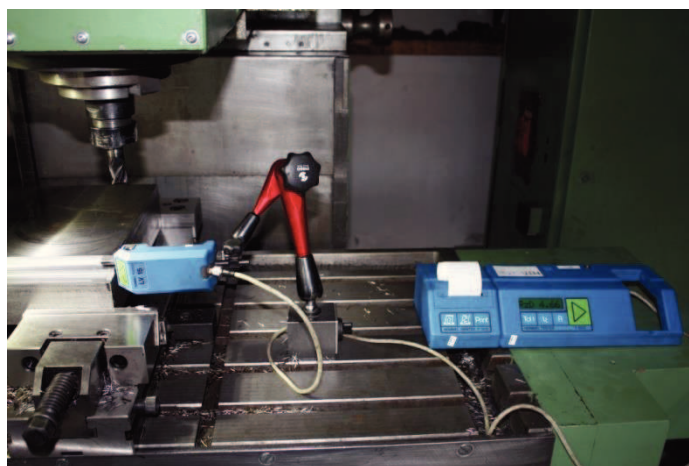
Program pro frézování kruhové desky je napsán pomocí příkazu pro kruhovou interpolaci. Na rozdíl od programu pro frézování v předcházejícím odstavci je použito absolutní programování. Počátek souřadného systému v osách x a y je umístěn do středu obrobku. Nulová hodnota osy z je umístěna na obráběný povrch.

8.5 Shrnutí

Cílem této kapitoly bylo seznámit s přípravou provádění experimentálního obrábění pro lineární úběr materiálu a pro frézování pomocí kruhové interpolace při frézování kruhového přířezu materiálu. Byl popsán stroj, na kterém se bude provádět experiment , včetně jeho úprav.

9. Měření drsnosti obrobené plochy

Po obrobení jedné třísky v automatickém CNC režimu, kde a_p je 12 mm a a_e 3 mm, se stroj zastaví s nástrojem ve vhodné pozici umožňující změření drsnosti povrchu. Drsnost povrchu se měří drsnoměrem Hommel Tester T 1000, naměřenou hodnotu odečteme z displeje přístroje a zapíšeme do tabulky. Zároveň vytiskneme grafický profil měřeného povrchu v délce 4,8 mm ve velkém zvětšení.



Obr. 9.01 Měření drsnosti povrchu po obrobení jedné vrstvy materiálu

Měřicí sonda přístroje Hommel Tester T 1000 musí být pevně přitisknuta k měřenému povrchu. Nejčastěji se k tomu používá digitální výškoměr. V našem případě byla obráběná plocha svislá a nebylo možné výškoměr použít. Měřicí sonda byla proto upnuta do kloubového magnetického stojánu Fisso. Přidržná síla stojánu byla dostatečná k provedení měření. Po ukončení měření se uvolnil upínací šroub stojánu a rameno se sondou se sklopilo do parkovací polohy. V této poloze byl měřicí přístroj přikryt ochranným krytem. Následně se spustil další obráběcí cyklus a po něm se opakovalo měření.

9.1 Naměřené hodnoty

První měření se provádělo pro kleštinový upínač a sousledné frézování. Frézování bočním úběrem s úběry a_p 12 mm a a_e 3 mm. Řezné podmínky $f = 225 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $n = 1\,000 \text{ min}^{-1}$. Před zahájením obrábění se po upnutí kleštinového držáku do vřetene stroje změřila házivost nástroje. Měření se provádělo průmyslovým měřidlem Magnescale se sondou DT512N japonské výroby s rozlišením 0,005 mm a s možností nulování na externím ovládacím a zobrazovacím panelu.



Obr. 9.02 Měření házivosti upnutého nástroje přístrojem Magnescale

Měřicí sonda přístroje Magnescale byla upnuta v kloubovém magnetickém stojánu Noga s přídržnou silou 1500 N pro zajištění objektivního měření. Pro každé měření bude použit nový nástroj. Předpokládá se, že nástroje mají identické vlastnosti.

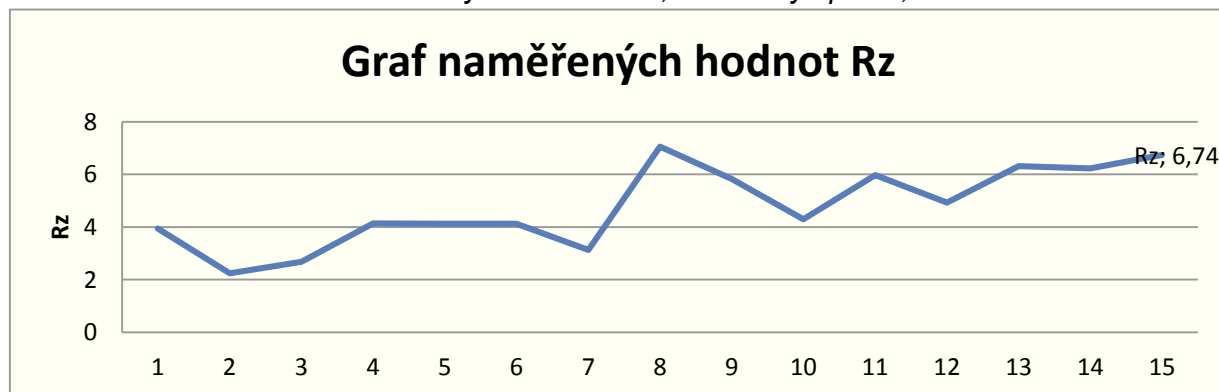
9.2 Měření kleštinového držáku, sousledné frézování

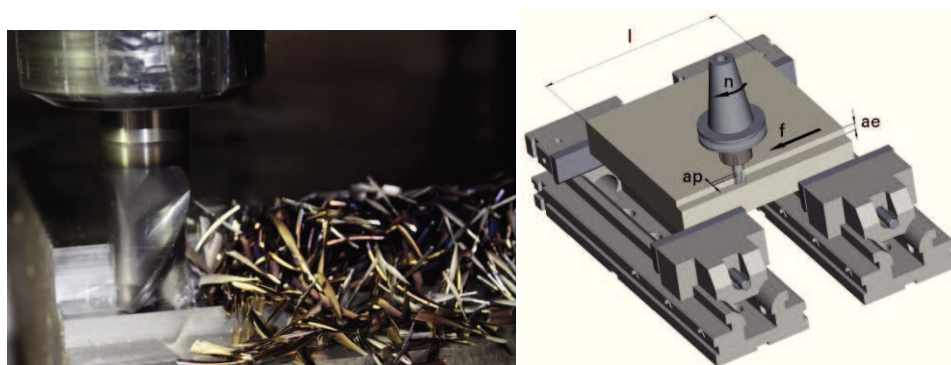
Naměřená hodnota házivosti nástroje upnutého v kleštinovém upínači byla 0,025mm. Do připravené tabulky byly zapisovány hodnoty drsnosti odečtené z displeje přístroje Hommel Tester T 1000. Přístroj navíc vytiskl na pruh termopapíru grafický průběh drsnosti povrchu.

Tab. 9.1 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu kleštinový upínač sousledné frézování

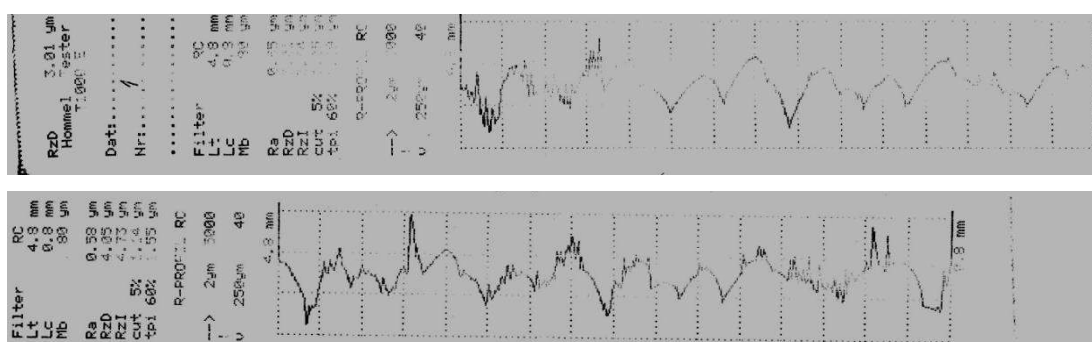
Tříska	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rz	3,01	3,16	3,74	3,48	4,66	4,27	4,24	4,8	4,22	4,28	4,63	4,74	5,02	4,54	4,56

Graf 9.2 Graf naměřených hodnot Rz , kleštinový upínač, sousledně





Obr. 9.03 Sousedné frézování, třísky mají po oddělení malou kinetickou energii a vyšší teplotu



Obr. 9.04 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro kleštinový upínač a sousledné frézování

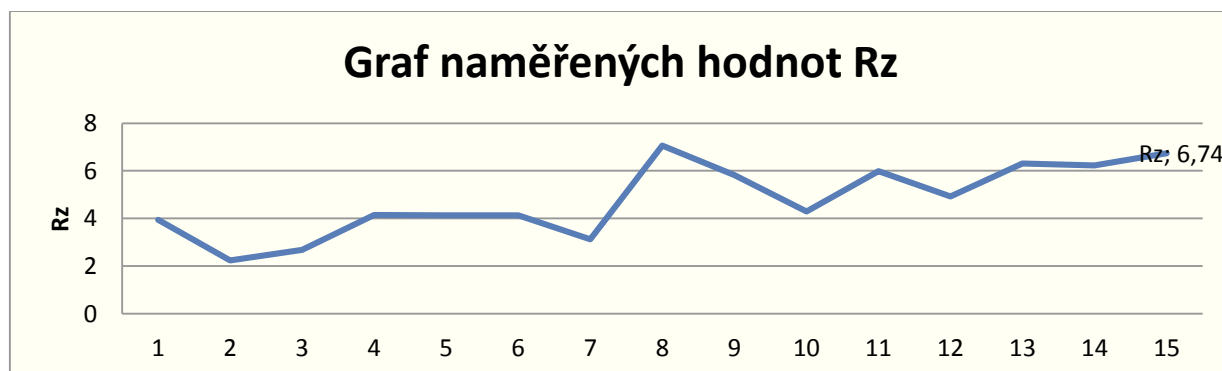
9.3 Měření držáku Weldon, sousledné frézování

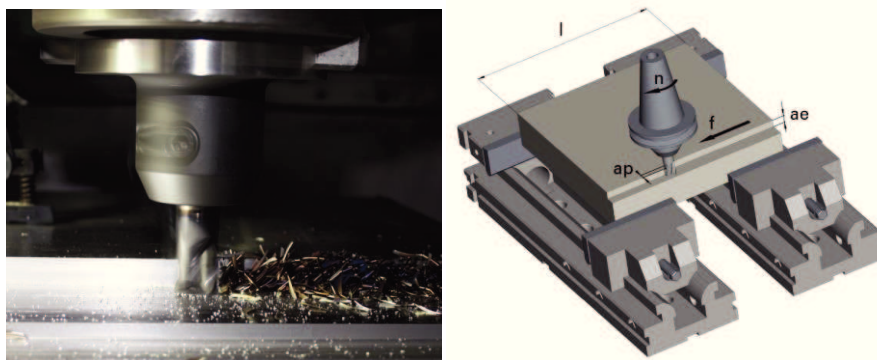
Naměřená hodnota házivosti nástroje upnutého v upínači Weldon byla 0,015mm. Do připravené tabulky byly zapisovány hodnoty drsnosti odečtené z displeje přístroje Hommel Tester T 1000.

Tab. 9.3 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu upínač Weldon sousledné frézování

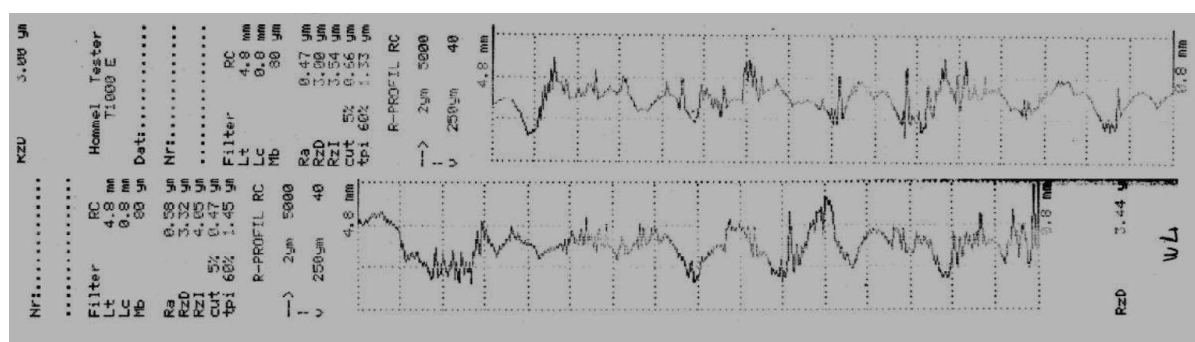
Tříska	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rz	3,11	3,25	3,32	3,54	2,87	3,46	3,26	3,01	3,11	3,50	3,8	3,48	4,12	4,04	3,52

Graf 9.4 Graf naměřených hodnot Rz, upínač Weldon, sousledně





Obr. 9.05 Sousedný způsob frézování nástrojem upnutým v držáku Weldon, vibrace držáku a teplota třísek byla srovnatelná s měřením s kleštinovým držákem



Obr. 9.06 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro držák weldon a sousledné frézování

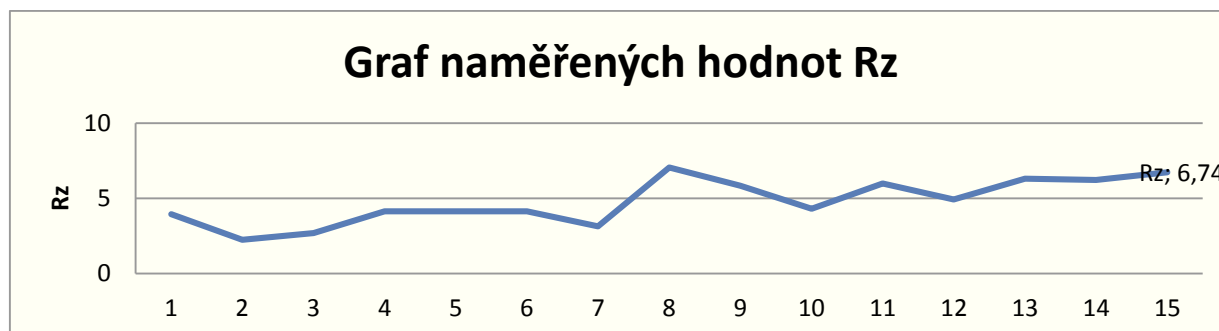
9.4 Měření termoupínače, sousledné frézování

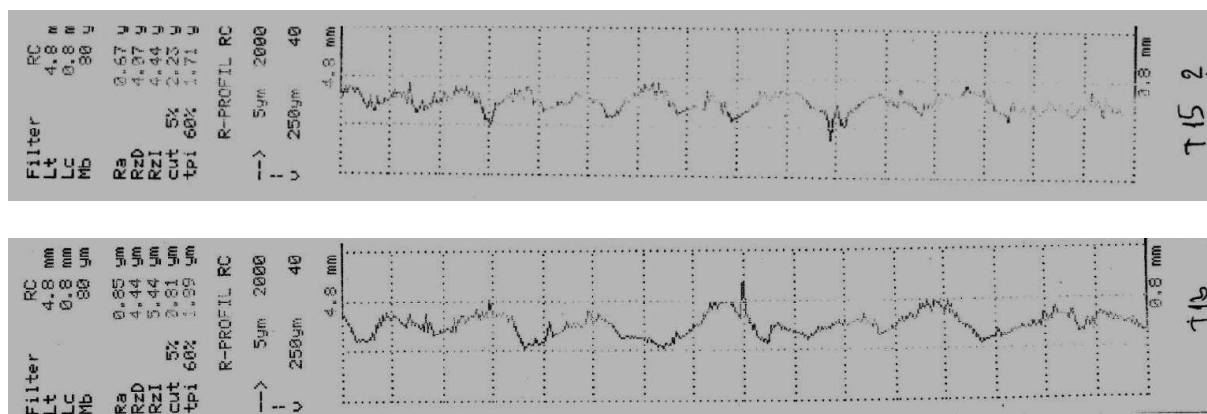
Naměřená hodnota házivosti nástroje upnutého v termoupínači byla 0,01mm.

Tab. 9.5 Naměřené hodnoty drsnosti termoupínače, sousledné frézování

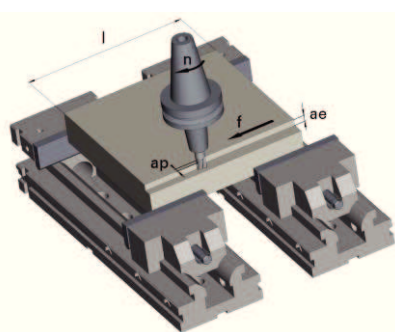
Tříška	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rz	7,01	4,92	4,81	3,91	3,91	4,08	4,62	3,44	3,54	3,58	3,82	4,44	3,84	4,07	4,27

Graf 9.6 Graf naměřených hodnot Rz, termoupínač, sousledně



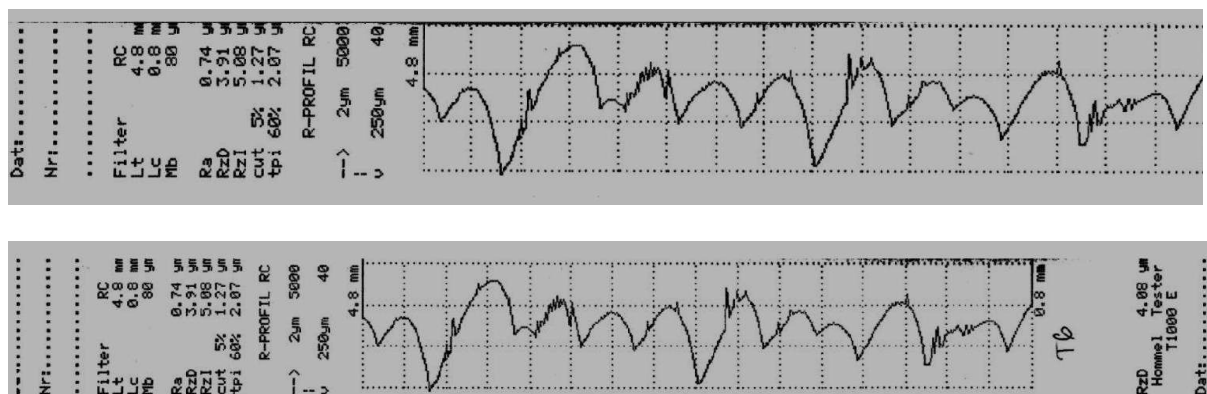


Obr. 9.07 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro termoupínač a sousledné frézování



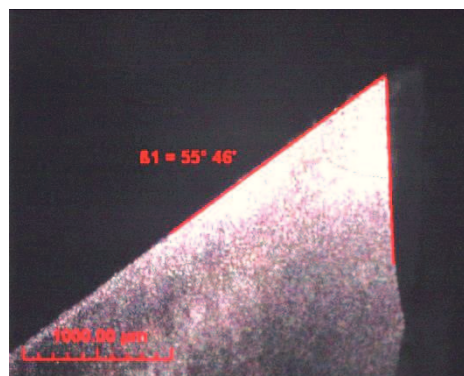
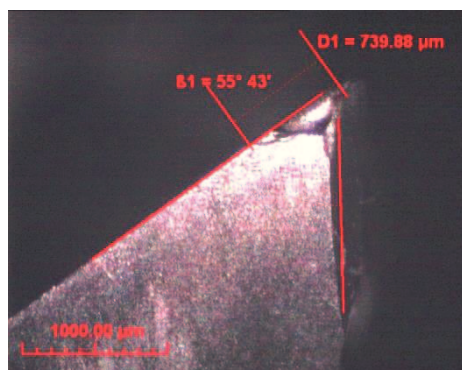
Obr. 9.08 Sousledný způsob frézování nástrojem upnutým termoupínači, vibrace držáku byla větší, zároveň byla větší kinetická energie oddělených třísek

Při sousledném frézování nástroji upnutými v termoupínači docházelo při původně nastavených řezných podmínkách k velkým vibracím. Řezné podmínky bylo nutné změnit. Optimálního chodu nástroj dosáhl při otáčkách 1400 ot/min a posuvu 446 mm/min. Potom také naměřená drsnost klesla na srovnatelné hodnoty, Výkon nástroje byl ale větší o 97%. Oddělování třísky probíhalo s větší kinetickou energií a třísky měly vyšší teplotu.

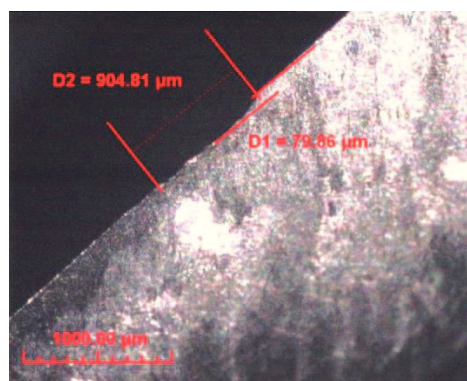
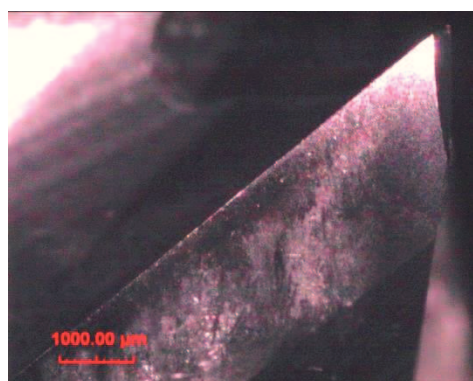


Obr. 9.09 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro držák weldon

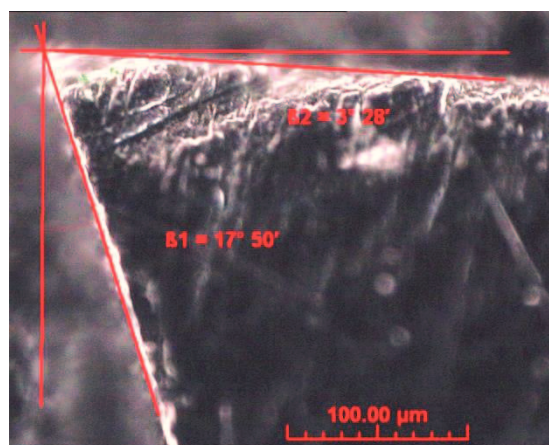
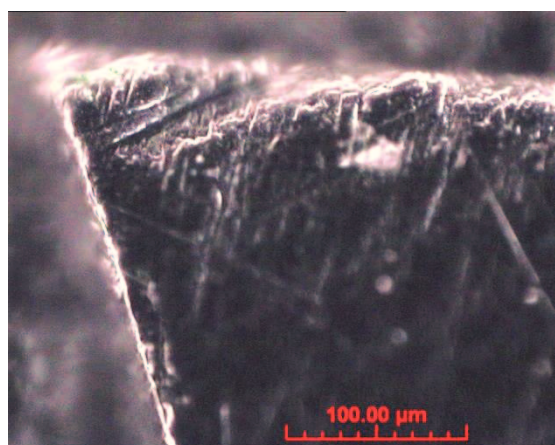
Po obrobení 15 cyklů, tzn. po oddělení 1,23 kg oceli, byly nástroje vyjmuty z držáků a byly pořízeny fotografie opotřebení břitů. Obrázky byly pořízeny metalografickým mikroskopem Neophot 32. Měření bylo provedeno pomocí procesoru Tescam.



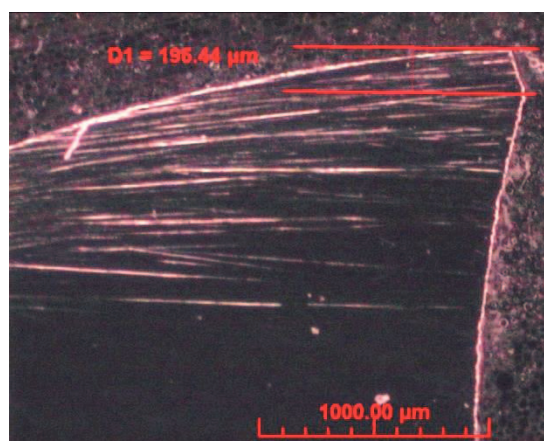
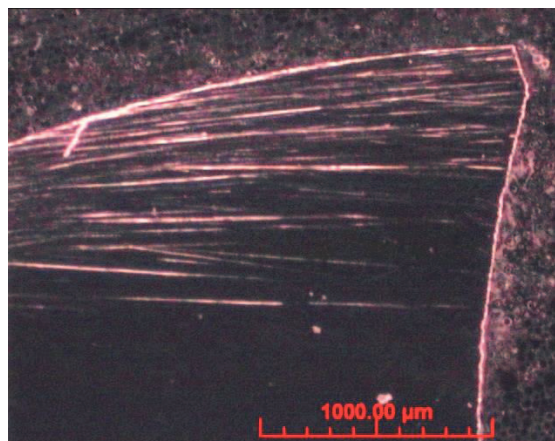
Obr. 9.10 Obrázek lomu špičky jednoho ostří, vpravo obrázek nepoškozeného ostří



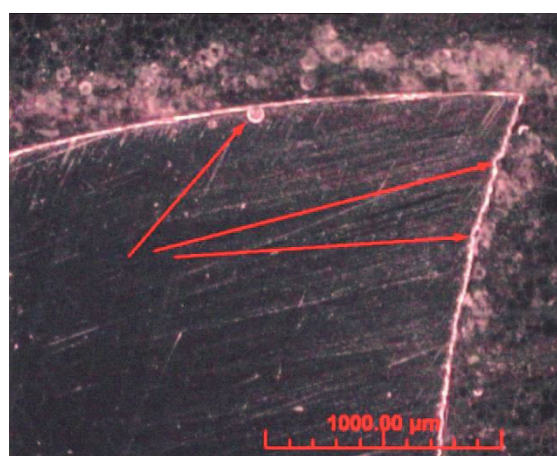
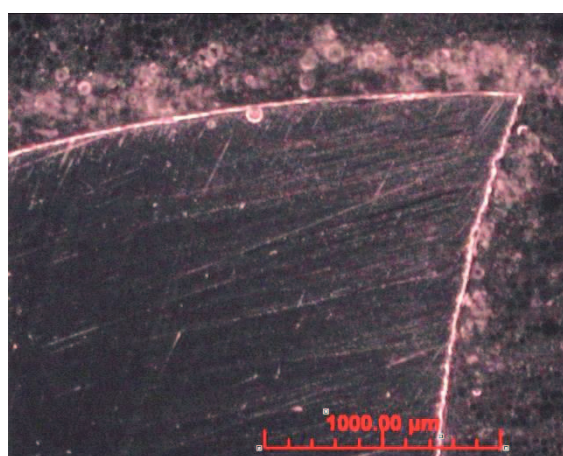
Obr. 9.11 Obrázek dalšího nepoškozeného břitu stejného nástroje, vpravo detail poškozených míst na povrchu nástroje



Obr. 9.12 Obrázek třetího poškozeného břitu nástroje abrazí, vpravo zakótované řezné úhly



Obr. 9.13 Detail poškozeného povrchu, odřený povrch hřbetu a ulomená špička nástroje



Obr. 9.14 Obrázek výrobních vad na povlaku nástrojů, na třech místech došlo k delaminaci naneseného PVD povlaku TiAlN

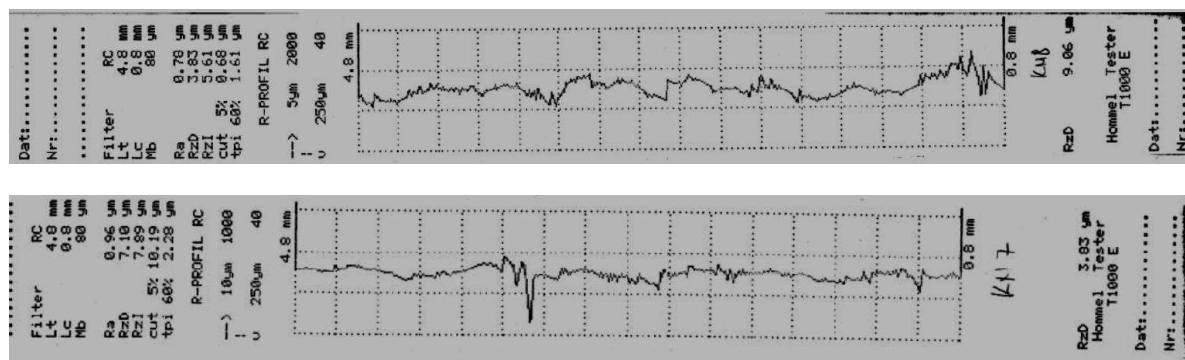
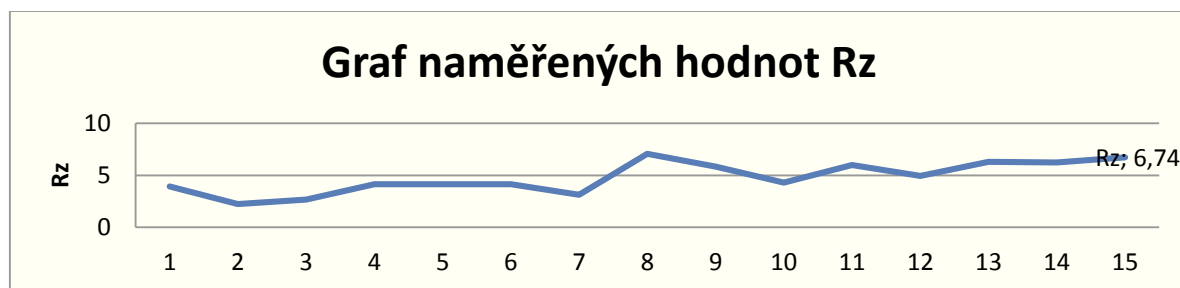
9.5 Měření kleštinového držáku, nesousledné frézování

Naměřená hodnota házivosti nástroje upnutého v upínači Weldon byla 0,015mm.

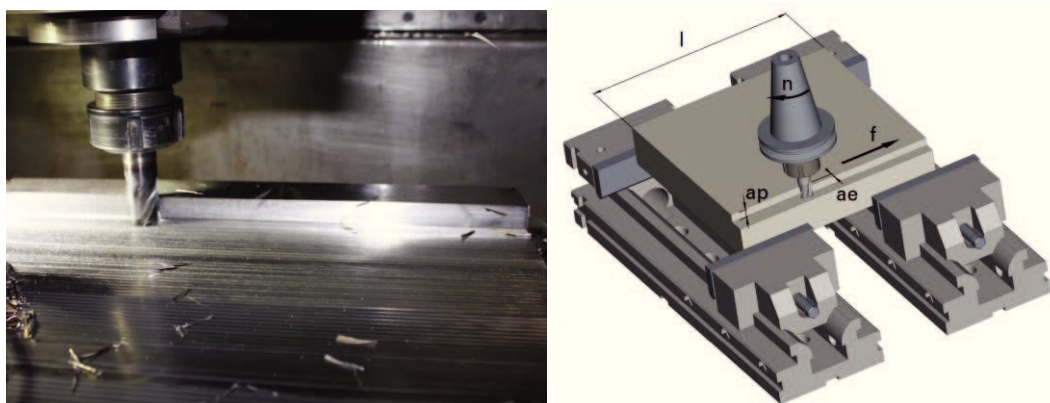
Tab. 9.6 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu, kleštinový upínač, nesousledné frézování

Tříska	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rz	3,33	2,93	4,17	4,80	8,34	7,10	3,83	9,06	5,22	3,44	4,22	4,16	3,64	7,65	11,86

Graf 9.7 Graf naměřených hodnot Rz, kleštinový upínač, nesousledně



Obr. 9.15 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro kleštinový držák a nesousledné frézování



Obr. 9.16 Nesousledný způsob frézování, oddělované třísky mají menší teplotu a větší kinetickou energii při oddělování, obrobený povrch má ale horší parametry

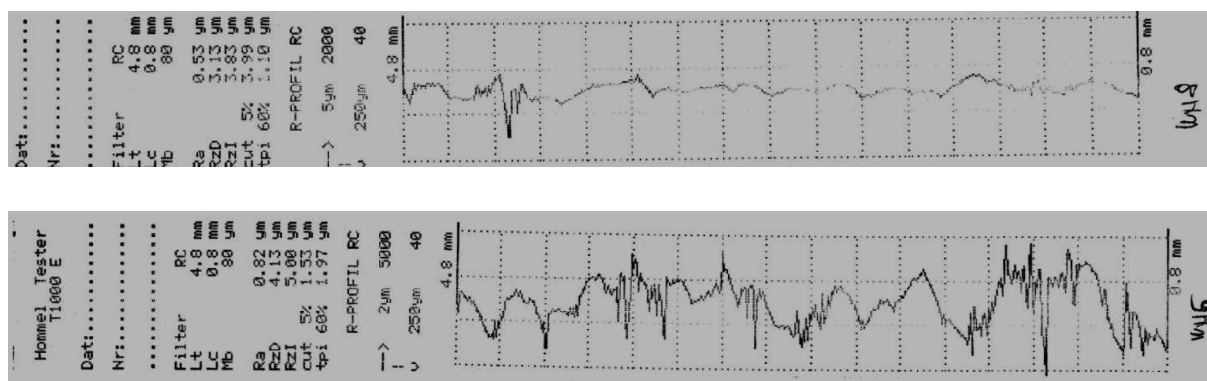
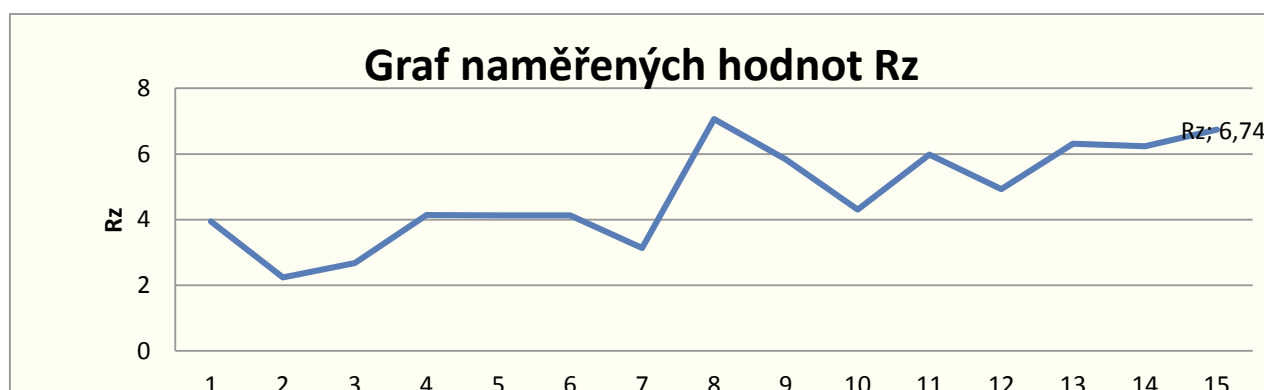
9.6 Měření držáku Weldon při nesousledném frézování

Naměřená hodnota házivosti nástroje upnutého v upínači weldon byla 0,015mm

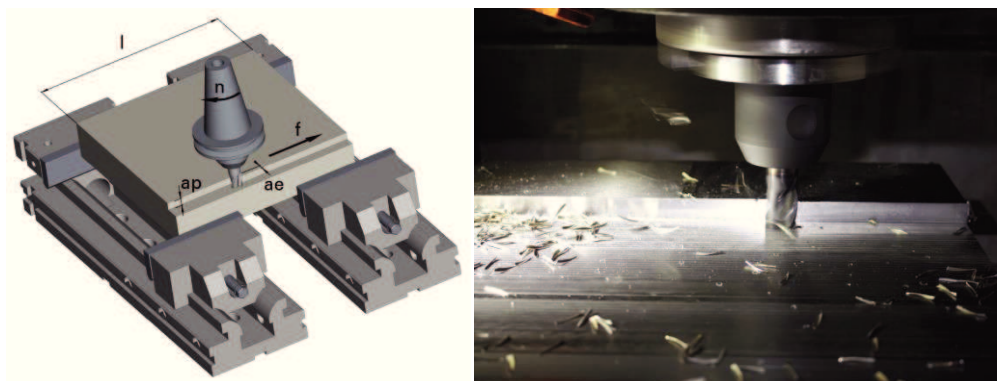
Tab. 9.8 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu, upínač Weldon nesousledné frézování

Tříska	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rz	3,94	2,24	2,68	4,14	4,13	4,13	3,13	7,06	5,83	4,30	5,98	4,93	6,31	6,23	6,74

Graf 9.9 Graf naměřených hodnot Rz, upínač Weldon, nesousledně



Obr. 9.17 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro upínač Weldon a nesousledné frézování



Obr. 9.18 Nesousledný způsob frézování pro držák Weldon. Oddělované třísky mají menší teplotu a větší kinetickou energii při oddělování, obrobený povrch má velmi kolísavou jakost

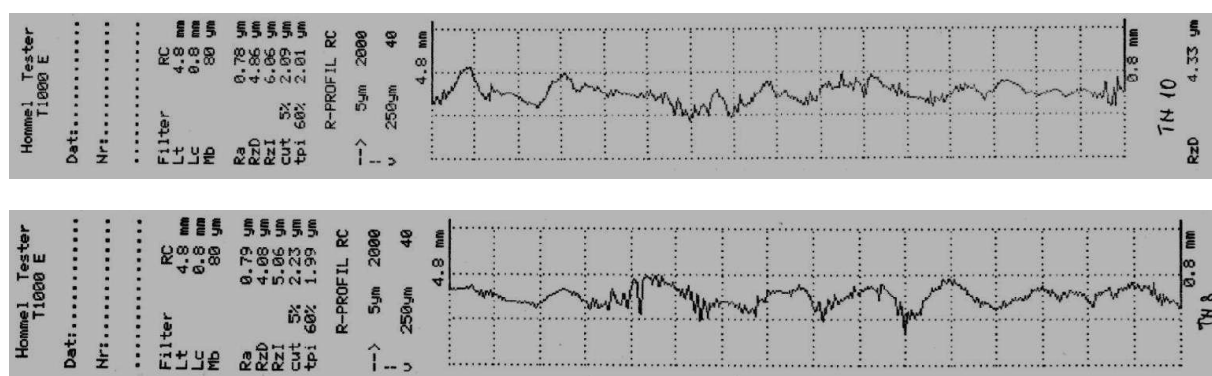
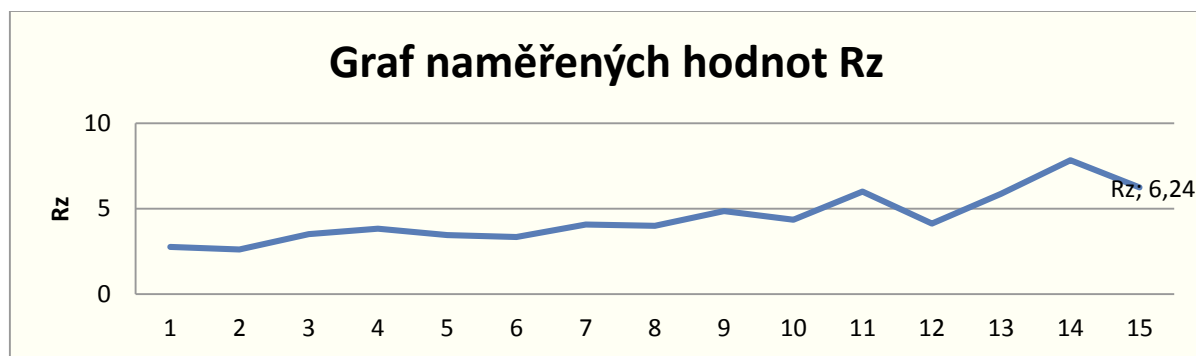
9.7 Měření termoupínače nesousledné frézování

Naměřená hodnota házivosti nástroje upnutého v termoupínači byla 0,01mm.

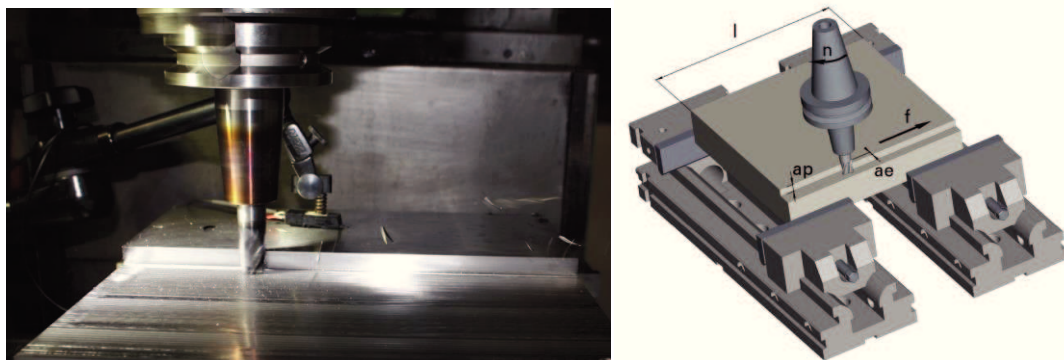
Tab. 9.9 Naměřené hodnoty drsnosti termoupínač, nesousledné frézování

Tříška	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rz	2,76	2,62	3,52	3,84	3,46	3,34	4,08	4,01	4,86	4,35	6,01	4,14	3,84	4,07	4,27

Graf 9.11 Graf naměřených hodnot Rz, termoupínač, nesousledně



Obr. 9.19 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro termoupínač a nesousledné frézování

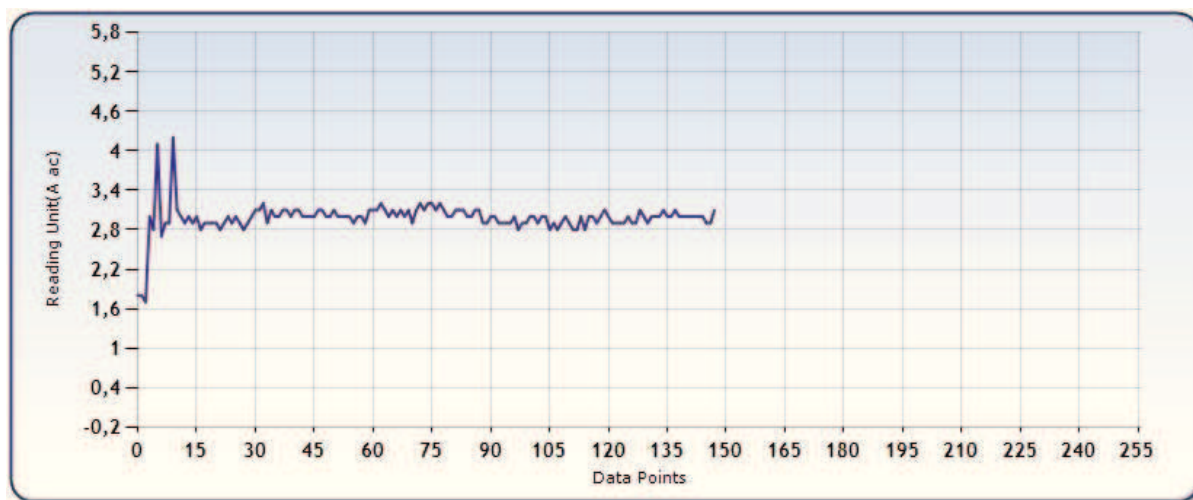


Obr. 9.20 Nesousledný způsob frézování pro termoupínač. Oddělované třísky mají menší teplotu a větší kinetickou energii při oddělování, obrobený povrch má ustálenou jakost

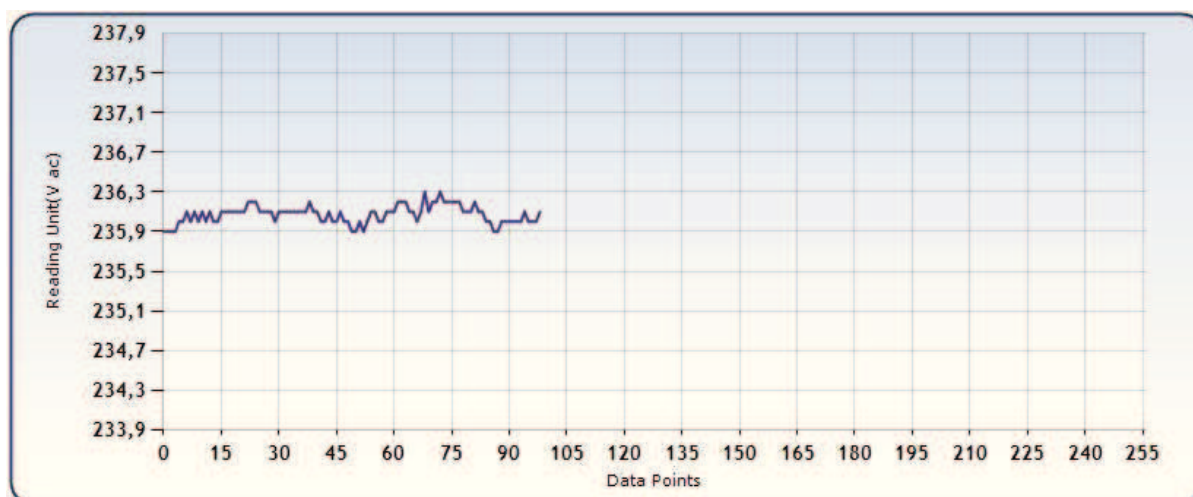
Měření příkonu stroje při frézování.

Měření výkonu při frézování bylo prováděno na vstupu měniče motoru vřetene přístrojem Fluke FC 3000 A. Naměřená hodnota byla automaticky zaznamenávána do přehledných tabulek. U všech způsobů obrábění byly naměřeny v rámci rozptylu daného citlivostí měřících přístrojů a stability vstupního napětí stejné hodnoty. Vliv sousledného či nesousledného způsobu frézování se u prováděného experimentu neprokázal. Při chodu

vřetena naprázdno, bez zatížení, při zařazeném 18. stupni otáček byl naměřen proud 1,7 A. Po zatížení frézováním a ustálení chodu byl opakovaně naměřen proud 3,05 A.



Obr.9.21 Měření proudu na vstupu měniče vřetena

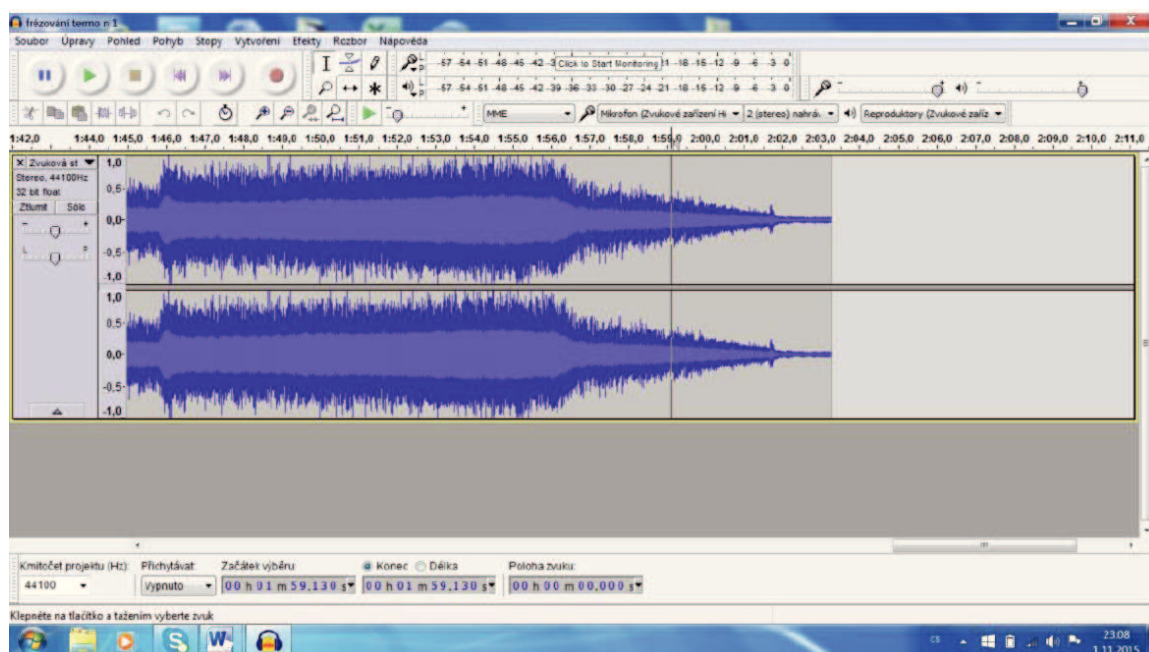


Obr.9.22 Měření napětí na vstupu měniče vřetena

Napětí na vstupu se pohybovalo v rozmezí 235,9 až 236,3 V. Výkon nutný pro otáčení vřeteníkem naprázdno je tak 1156 W. Při frézování stroj odebíral celkem 2 074 W. Čistý výkon pro obrábění tak činil 918 W. Měření výkonu pomocí kalorimetru nebylo možné provést. Při frézování nebylo možné zachytit všechny vznikající třísky. Měření touto metodou by tak bylo zatíženo příliš velkou chybou, kterou není možné spolehlivě eliminovat. Pro kontrolu výkonu je tak měření příkonu vřetene při frézování dostatečně přesné, a to zejména, když se v průběhu experimentu nemění otáčky vřeteníku a stroj je zahřátý na provozní teplotu.

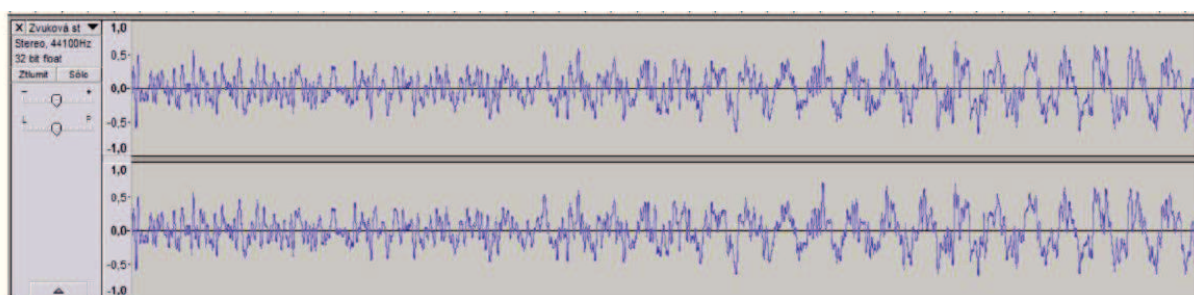
9.8 Měření vibrací vznikajících při obrábění.

Při obrábění se pomocí piezoelektrického čidla měřily vibrace vznikající při obrábění. Pro záznam do paměti NB byl využit volně dostupný SW Audacity. Vibrace byly zaznamenávány na disk počítače po celou dobu obrábění. Od spuštění programu do jeho ukončení.



Obr. 9.23 Měření vibrací na obráběném materiálu, průběh celého programu

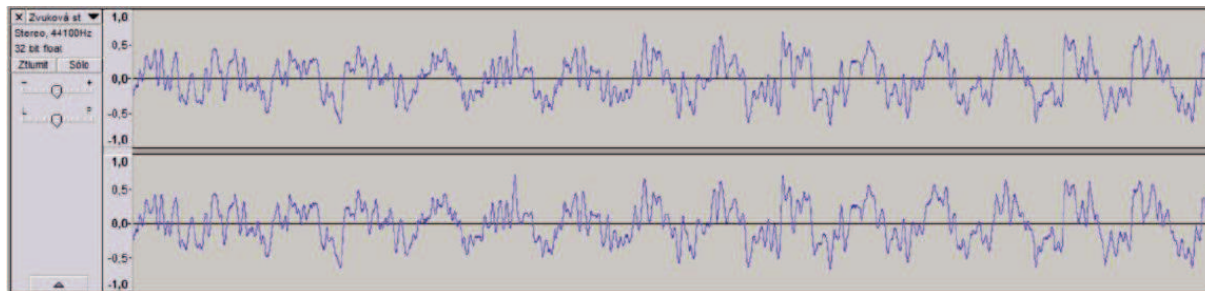
Na začátku záznamu je zaznamenán hluk pozadí. Po té se hladina vibrací prudce zvýší při záběru frézy do materiálu, postupně se mírně zvyšuje. Tento jev byl způsoben přibližováním nástroje ke snímači a na závěr se vibrace snižují k nule při doběhu vřeteníku. Při použití většího měřítka je možné vidět vyšší frekvenci pozadí a snížení celkové frekvence při záběru frézy do materiálu.



Obr. 9.24 Měření vibrací na obráběném materiálu, přechod vibrací pozadí a vibrací způsobených obráběním

Je nutné si uvědomit, že vibrace, znázorněné ve třetí třetině záznamu jsou superpozicí hluku pozadí a záběru zubů frézy. Ani na podrobnějším záznamu průběhu vibrací frézy není možné spolehlivě rozpoznat nějaké nerovnoměrnosti chodu - zvýšenou házivost nástroje -

z toho vyplývající rozdílné tloušťky třísek od jednotlivých zubů či opotřebením vzniklé nestejněměrné vady řezných hran.



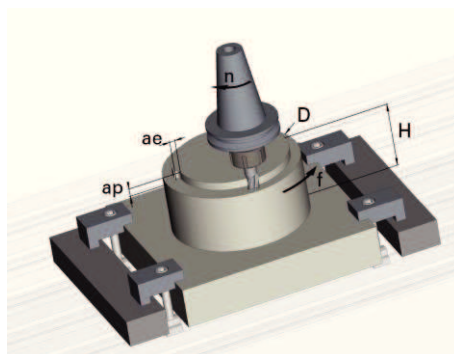
Obr. 9.25 Měření vibrací na obráběném materiálu, přechod vibrací pozadí a vibrací způsobených obráběním ve větším zvětšení

Při zkoumání záznamu vibrací je možné rozeznat jednotlivé záběry zubů frézy. Frekvence záběrů odpovídá počtu otáček vřetene a počtu zubů nástroje. Pro otáčky nástroje 1000 ot.min^{-1} a tři zuby je 50 Hz . Aplikace Audacity v níž byl záznam pořízen umožňuje potlačení nežádoucích frekvencí. Proto jsme filtr nastavili na frekvenci $45\text{--}55 \text{ Hz}$, ostatní frekvence byly úmyslně potlačeny.

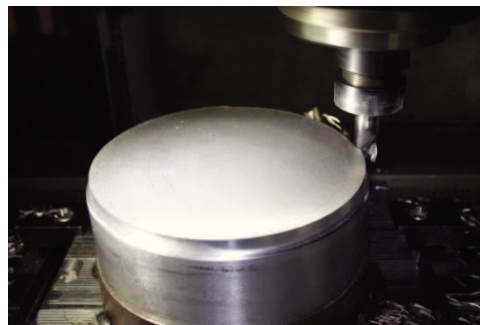
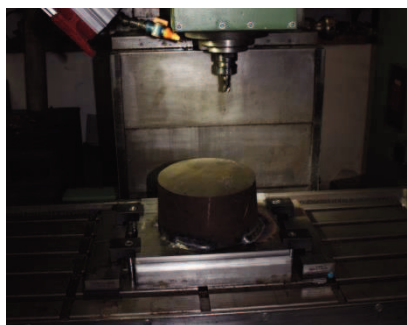
Tvar jednotlivých křivek nám ale bez podrobnější analýzy a případné SW filtrace nic nevypoví. Jedním z důvodů může být vysoká hladina vibrací pozadí způsobená mechanickými převody v převodové skříní vřeteníku a v kuželovém soukolí vertikálního vřetena. Při analýze hluku na stroji bez mechanické převodovky by analýza vibrací byla patrně jednodušší.

9.9 Měření upínačů při frézování kruhovou interpolací.

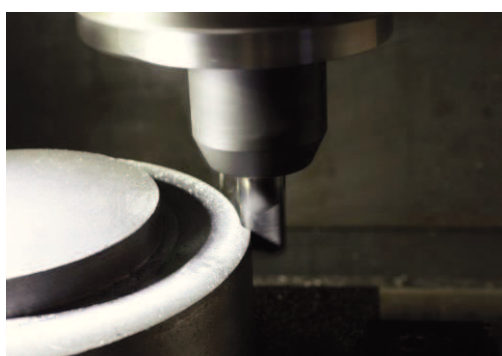
Po ukončení měření experimentů pro měření drsnosti povrchu, příkonu vřetene a vibrací při frézování lineárním úběrem bylo pokračováno stejným způsobem pro frézování kruhovou interpolací.



Obr. 9.26 Příprava materiálu pro frézování kruhovou interpolací, nesousledné a sousledné frézování



Obr. 9.27 Příprava materiálu pro frézování kruhovou interpolací, sousledné frézování nástrojem upnutým v kleštinovém upínači



Obr. 9.28 Frézování kruhovou interpolací, sousledné frézování nástrojem upnutým v upínači Weldon a nesousledné frézování nástrojem upnutým v termoupínači

Byl proveden stejný počet experimentů s prakticky identickými výsledky. Tady můžeme použít Paradox z antického Řecka:

„Mějme malou hromadu kamení. Pokud přidáme jeden kámen, dostaneme opět malou hromadu. Tedy každá hromada kamení je malá.“

Protože naměřené hodnoty jsou stejné, nemůžou nám další data nijak přispět k řešení problému. Z toho důvodu vyhodnocení dat z obrábění kruhovou interpolací nebudeme používat.

10 Závěry

Volba typu upínače nástrojů pro frézovací pro obráběcí stroje závisí na celé řadě parametrů. Nelze všeobecně stanovit, který upínač je vhodnější pro celé spektrum obráběcích operací. Důležitý je také neustálý technický rozvoj, kdy každý rok přináší nová technická řešení upínačů nebo alespoň výrazná vylepšení, která posunují svět techniky vpřed.

V této disertační práci byla řešena vhodnost použití termoupínačů pro frézovací operace. Experimenty byly prováděny na upraveném obráběcím stroji s možností plynule měnit řezné podmínky a průběžně zaznamenávat dosažené hodnoty. Současně byly snímány hodnoty zatížení vřetene a tedy energetickou spotřebu pro oddělování třísek při použití jednotlivých upínačů. Drsnost povrchu byla měřena certifikovaným přístrojem. Naměřené hodnoty jsou tedy věrohodné a poskytují dobré předpoklady pro objektivní závěry. Pro porovnání je jako etalon použit termoupínač, hodnocení drsnosti obrobeného povrchu, vibrací, životnosti řezné hrany a vnějších rozměrů je tak vztaženo k tomuto typu upínačů

Tab. 10. Tabulka s výsledky experimentů

Typ upínače	Drsnost sousledně [μm]	Drsnost nesousled. [μm]	Víbrace sousledně [%]	Víbrace nesousled. [%]	Drsnost sousledně porovnání	Drsnost nesousled. porovnání	Vnější rozměry upínače
Termoupínač	4,28	3,94	100	100	100	100	100
Kleštinový upínač	4,22	5,58	85	100	98	141	140
Upínač weldon	3,43	4,78	80	90	80	121	120

Před zahájením experimentu bylo stanoveno, že jako hraniční drsnost pro ukončení zkoušky frézování bude dosažení 200% výchozí drsnosti vyhodnocované parametrem Rz. Při přípravě experimentu byla zkušebně provedena jedna sada experimentů pro všechny upínače. Z výsledků této prvotní zkoušky bylo zjištěno, že zvětšení parametru Rz na hodnotu 200% výchozího stavu dochází po 15 úběrech při frézování osazení daným monolitním třízubým nástrojem zhotoveným ze slinutého karbidu, při práci bez použití procesní kapaliny. Každý nástroj tak během zkoušky odebral celkem 1230 g materiálu ze zkušebního bloku zhotoveného z oceli 11 523. U žádného z použitých nástrojů nedošlo k během zkoušek jeho destrukci, ani k výraznějšímu poškození řezných hran. Termoupínače, osazené identickými nástroji jako porovnávané nástrojové držáky kleštinové a typu weldon vykazují o cca 20 až

40% lepší průměrnou drsnost povrchu při nesousledném frézování. Při sousledném frézování však u nich vznikají poměrně velké vibrace dané štíhlostí a tím menší tuhostí držáku. Pro odstranění vibrací bylo nutné řezné podmínky změnit tak, aby budící frekvence byla vyšší než vlastní frekvence upínače. Potom byla výsledná průměrná drsnost povrchu srovnatelná s kleštinovým upínačem. Není proto vhodné termoupínače používat při nižších otáčkách. To však v současné době není problémem. Nová obráběcí centra dodávaná do průmyslových podniků mají potřebný rozsah otáček již v základním provedení. Při zkouškách nebylo možné využít otáčky vyšší jak $2\,500\text{ ot.min}^{-1}$. Pro testování nástrojových držáků s nástroji o menším průměru bude příště nutné použít obráběcí centra alespoň s $8\,000\text{ ot.min}^{-1}$ vřeten. Zkoušky prokázaly, že termoupínače mají vyšší a stálou přesnost upínání nástroje a poměrně snadné nastavení délky nástroje. Házivost upnutého nástroje byla v termoupínači ve všech případech $0,01\text{ mm}$. Upínač Weldon vykazoval házivost upnutého nástroje $0,15\text{ mm}$. Kleštinový upínač měl největší házivost upnutého nástroje, ta se pohybovala se od $0,015$ do $0,025\text{ mm}$. Další důležitou výhodou je konstantní upínací síla nezávislá na obsluze, daná jen přesahem nástroje vůči otvoru v upínači. Jedinou podstatnou nevýhodou je malá tlumící schopnost upínače. Nevýhoda v nutnosti použití speciálního přístroje pro ohřev držáku je pouze zdánlivá. Indukční přístroje jsou již poměrně rozšířené a nejsou tak hlavní překážkou většího rozšíření používání termoupínačů. V kapitole 7 je podrobně popsána konstrukce přístrojů pro indukční ohřev, a jak bylo zdokumentováno, není obtížné takový přístroj sestavit z běžně dostupných součástek. Největším argumentem pro použití termoupínačů je mimo nezpochybnitelné technické přednosti jejich štíhlý tvar umožňující práci v členitých obrobcích a stabilitu přesnost upnutí nástrojů.

10.1 Přínos pro využití v praxi

Ze závěrů vyplývajících z této práce je možné konstatovat, že termoupínače jsou dobrou první volbou upínačů pro nástroje obráběcích center. Pouze na úzké spektrum použití, kde je potřeba mít nástrojové držáky s tlumícími schopnostmi se tyto držáky nehodí. Je výhodnější je používat zejména tam, kde budou použity při vyšších řezných rychlostech a otáčkách. Toto omezení se ale vlivem technického rozvoje postupně mění, jednak zdokonalováním konstrukce termoupínačů, upínacích kuželů a vřeten strojů, ale také novými konstrukcemi upínačů. Na trhu jsou již nyní termoupínače kombinované s tvarovým zajištěním upnutého nástroje proti vytažení z dutiny upínače a současně jednoduchým mechanismem pro snadné uvolnění nástroje při indukčním ohřevu upínače. Je proto nutné neustále sledovat novinky v odborném tisku, a na technický vývoj průběžně reagovat.

10.2 Vědecký přínos

Za přínosy pro vědu je možné zařadit metodiku zkoušek a použití nového indukčního přístroje WNDI pro ohřev držáků s rezonančním zapojením výkonového bloku elektroniky. Dalším přínosem je přesné změření teplot nutných pro bezproblémové odepínání nástrojů z upínačů. Pro další výzkum je nastíněna problematika korelace drsnosti obrobené plochy s měřitelnými vibracemi obrobku. Zde je nutné najít vhodnější snímač vibrací a SW účinně potlačující záznam vibrací pozadí. Pokud se takové řešení najde, bude možné simultánně sledovat touto nepřímou metodou zejména integritu obráběcího nástroje a alespoň orientačně drsnost právě obráběné plochy. To by mělo vliv na zvýšení efektivity využití obráběcích center zejména v bezobslužném provozu, při obrábění dílců s velmi dlouhými cyklovými časy. Současně by mohlo dojít k eliminaci škod způsobených neočekávaným lomem řezné hrany.

11 Conclusions

Selection of the types of tool chucks for milling machines and machine tools depends on a number of parameters. It is not possible to state generally which chuck is more suitable for the whole range of machining operations. A continuous technical development is also important, when each year brings new technical solutions for chucks or at least significant improvements which move the technical world forward.

This dissertation thesis dealt with the suitability of using thermal chucks for milling operations. Experiments were performed on a modified machine tool with the possibility to smoothly change the cutting conditions and to continuously record the values achieved. Also, the spindle load values were sensed, i.e. the energy demand for separating millings when using individual chucks. The surface roughness was measured with a certified instrument. It means that the measured values are reliable and provide preconditions for objective conclusions. A thermal chuck is used as a standard for comparison, so the evaluation of the roughness of the machined surface, vibrations, the life of the cutting edge and outer dimensions are referred to this type of chucks.

Chuck type	Roughness down-cut [μm]	Roughness up-cut [μm]	Vibrations down-cut [%]	Vibrations up- cut [%]	down-cut comparison	Roughness up-cut comparison [%]	Chuck outer dimensions [%]
Thermal chuck	4,28	3,94	100	100	100	100	100
Sleeve chuck	4,22	5,58	85	100	98	141	140
Weldon chuck	3,43	4,78	80	90	80	121	120

Thermal chucks fitted with identical tools as the compared tool sleeve and Weldon chucks show by approx. 20% to 40% better average surface roughness in up-cut milling. However, in down-cut milling relatively large vibrations occur in them given by the slenderness and thus a smaller rigidity of the chuck. To eliminate vibrations, it was necessary to change the cutting conditions so that the excitation frequency is higher than the natural frequency of the chuck. Then the resultant average surface roughness was comparable with the sleeve chuck. It is not, therefore, useful to use thermal chucks at lower speeds. However, this is not a problem today. New machining centres supplied to industrial enterprises have the necessary speed range in the standard version. During tests, it was not possible to use a speed higher than 2 500 rpm. To test tool chucks with tools in smaller diameters, next time it will be necessary to use machining tools with at least 8 000 rpm of the spindle. The tests

have proven that thermal chucks have a higher accuracy of tool chucking and a relatively easy setting of the tool length. Another important advantage is the constant chucking power independent of the operator, only given by the overlap of the tool against the hole in the chuck. The only substantial disadvantage is a small damping capacity of the chuck. The disadvantage in the necessity to use a special device to heat the chuck is only apparent. Induction devices are relatively spread, so they are not the main obstacle for a wider spread of using thermal chucks. Chapter 7 describes in details the construction of devices for induction heating and, as it has been documented, it is not difficult to construct such a device by using commonly available components. Apart from their undisputable advantages, the biggest argument for using thermal chucks is their slim shape allowing them to work in shape complex work pieces.

11.1 Benefits for using in practice

From the conclusions arising from this thesis it can be stated that thermal chucks are a good first choice of chucks for the tools of machining centres. These chucks are not suitable only for a narrow range of applications for which it is necessary to use tool chucks with damping capacities. However, this limitation gradually changes through technical development by improving the construction of thermal chucks, chucking cones and machine spindles, and also by new constructions of chucks. It is necessary to continuously monitor novelties in the technical press and to continuously react on the technical development.

11.2 Scientific benefit

Benefits for science can include the test methodology and using the new induction device WNDI for heating chucks with the resonance connection of the power block of the electronics. Another benefit is the accurate measurement of temperatures required for trouble-free unclamping tools from chucks. For further research, the problems of correlation of machined surface roughness with measurable work piece vibrations is outlined. There it is necessary to find a more suitable vibration sensor and software efficiently suppressing the background vibration recording. If such a solution is found, it will be possible to simultaneously monitor, using this indirect method, particularly the integrity of the cutting tool and at least informatively the roughness of the surface being machined. This would have an effect on increasing the effectiveness of utilization of machining centres, particularly in attendance-free operations, in machining parts with very long cycle times. At the same time, the damage caused by an unexpected break of the cutting edge could be eliminated.

POUŽITÁ A STUDOVANÁ LITERATURA

- [1] ZELENÝ, J. *Vysokorychlostní obrábění*. MM průmyslové spectrum. 2000. ISSN 1212- 2572.
- [2] BRYCHTA, J. *Možnosti zvyšování efektivity obrábění prostorových ploch nepravidelných tvarů frézováním* : teze habilitační práce. Ostrava : VŠB- TUO 2001.
- [3] NESLUŠAN, M., TUREK, S., BEYCHTA, J., ČEP, R., TABAČEK, M.: *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*, Vydavateľstvo ŽU EDIS Žilina: Žilina 2007. 343s. ISBN 978-80- 8070-7011-8.
- [4] VASILKO, K., HRUBÝ, J., LIPTÁK, J. : *Technológia obrábania a montáže*. ALFA Bratislava 1988, 1991. 496s. ISBN 80-05-00807-4.
- [5] AB SANDVIK COROMANT- SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praxe*. Přeložil M.Kudela. 1. Vydání , Praha : Scientia, s.r.o. 1997. 857 s. Přeloženo z : Modern Metal Cutting- A Practical Handbook.ISBN 91-9722 99-4-6.
- [6] Bilík, O. : *Obrábění I, 1. Díl*; Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava 2001, 88 s. ISBN 80- 7078- 811-9.
- [7] Manka, P., Pouliková, A : *Top trendy v obrábění* , 2007, 145 s.
- [8] Vasilko, K., Havrika, M., Novák, J., Mádl, J. ,Zajac J. : *Top trendy v obrábění*, 2006, 71s.
- [9] Mohyla, M., Mohyla, P., *Strojírenské materiály II*,Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava 2006, 141 s. ISBN 80-248-0270-8.
- [10] Mohyla, M., *Strojírenské materiály*, Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava 2003, 141 s. ISBN 80-248-0270-8.
- [11] Bilík, O.,*Obrábění I, 2. Díl*; Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava 2006, 80 s. ISBN 80-248- 0033-0.
- [12] Humár, A., *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*, CCB spol. s r.o., Brno, 1995 , 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
- [13] Kocman, K., Prokop, J.,*Technologie obrábění*, FS VUT Brno, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [14] Jurko, J., Zajac, J., Čep, R.,*Top trendy v obrábění*, 2006, 16 s.
- [15] Bilík O., *Obrábění II, 2. Díl*; Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava 1995, 113 s. ISBN 80-7078- 269-2.
- [16] Hrubý, J., *Teorie obrábění*, ; Ostrava: FS VŠB Ostrava 1985, 212 s.
- [17] Mrkvica, M., *Obrábění I, 1.díl*, ; Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava 1993, 141s. ISBN 80-7078-213-7.
- [18] Havrila, M., Jurko J., Zajac J.,Brychta J., *Top trendy v obrábění*, 2006, 87 s.

- [19] Přikryl, Z. a kol. : Technologie obrábění, Praha: SNTL, 1967, 31 s.
- [20] Bilík, O., *Obrábění II*, 1. Díl; Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava 1994, 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
- [21] MRKVICA, I., *Návody do cvičení z obráběcích nástrojů- 1.část*. 1.vydání. Ostrava : VŠB-TU Ostrava,1999 142s. ISBN 80-7078-624-8.
- [22] VRBA,Vladimír. *Využití supertvrdých řezných materiálů*. In. Vědecká konference ke 40. Výročí založení FSE VŠB Ostrava TECHNOLOGIE(S.Šlejmar (Ed.)), Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava ,1990. 180 s.
- [23] KOUŘIL, Karel., *Nástroje a vyměnitelné břitové destičky osazené polykrystalickými supertvrdými materiály*. PRAMET '96. Progresivní řezné nástroje. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1996.
- [24] PERRY, J., *Ceramics as everyday engineering components in Ceramics Industrie Journal*. 1985. Roč. XII, č. 1054.
- [25] SANDVIK Coromant, *Technical Editorial dept. Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. Tofters Tryckery AB Sveden, 1994, 927s. ISBN 91-972290-0-3.
- [26] BRYCHTA, Josef; Foltýn, Petr, *Machinability Assesment and Cuting Temperature Test*. In DOKSEM 2004 – Mezinárodní doktorandská konferencia. Terchová : Žilinská Univerzita v Žilině, 2004, ISBN 80-8070-323-X.
- [27] RATH, Jindřich; POSPÍŠIL, Zdeněk a kol. *Jemná mechanika – metodika měření a zkoušek*. Praha : SNTL Praha, 1988. 388 s.
- [28] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s. Třídící znak 01 4450.
- [29] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie*. Část 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2014. 110 s. ISBN 978-80-248-2738-4.
- [30] JAMES, M., LU, J., ROY, G.: *Handbook of measurement of residual stresses*. SEM, Fairmont Press, INC., 1996, ISBN 0-88173-229-X.
- [31] ASTM E837-08 *Standard Test Method for Hole-Drilling Strain Gage Method*, Amer. Soc. for Testing and Materials, (2008).
- [32] EVERS, Derrick. *Interrupted Turning: Innovations in turning tooling combat the challenges of interrupted cutting*. Canada's Metalworking & Fabricating Technology Magazine. 2009, č. 9. Dostupné z [www: http://www.cimindustry.com/article/tooling/interrupted-turning](http://www.cimindustry.com/article/tooling/interrupted-turning)
- [33] VLK, M.; HOUFEK, I.; HLAVOŇ, P.; KREJČÍ, P.; KOTEK, V.; KLEMENT, J. *EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKA [online]*. Brno, 2003 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium_/opory/Experimentalni_mechanika.pdf

- [34] VRBA, Vladimír; ČEP, Robert. *Zvyšování přesnosti výroby použitím výkonných řezných nástrojů*. In *International Congress Of Precision Machining 2001*, 5.–7. září 2001. Ústí nad Labem : UJEP Ústí nad Labem, 2001, s. 244–250. ISBN 80–7044–358–8.
- [35] BÁTORA, Bohumil. *Obrobené povrchy: technologická dedičnost, funkčnost*. Trenčín: Trenčianska univerzita, 2000, 183 s. ISBN 80-88914-19-1.
- [36] VOS, Patrick. *Příručka pro technology – opotřebení se nevyhneme*. MM Průmyslové spektrum. 54 – 56 s. Červen 2012.
- [37] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I* [online]. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4010-4.
- [38] OTIPKA, P., ŠMAJSTRLA, V. *Pravděpodobnost a statistika*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Katedra matematiky a deskriptivní geometrie. 2008, 266 s. ISBN 80-248-1194-4.
- [39] SADÍLEK, M., SADÍLKOVÁ, Z. *Počítačová podpora procesu obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2012. 149 s. ISBN 978-80-248-2770-4.
- [40] SMID, P. *CNC Programming Handbook – Ebook*. New York: Industrial Press Inc. 2005, 330 s. ISBN 0-8311-3282-5.
- [41] MATTSON, M. *CNC Programming: Principles and Applications*. New York. 2009. 432 s. ISBN 978-1-4180-6099-2.
- [42] SMID, P. *CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming*. New York: Industrial Press Inc. 2003, 600 s. ISBN 0-8311-3158-6.
- [43] ČEP, Robert., *Zvyšování přesnosti výroby použitím výkonných řezných nástrojů*. In *WORKSHOP Fakulty strojní 2002 Ostrava* : VŠB – TU Ostrava, 2003, 16 s. ISBN 80-248-0233-3
- [44] Brychta, Josef; VRBA, Vladimír., *Zvyšování efektivity výroby forem a zápusťek výkonnostním frézováním progresivními řeznými nástroji*. IN *Frézování III*. Odborná conference FSI VUT v Brně, Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství- 2003, 175 s. ISBN 80-214-2436-2.
- [45] *Milling*. Kennametal Inc, Catalog 6050, Latrobe, PA 15650, USA, 2006.
- [46] SERVUS, T., *Trendy vývoje upínání řezných nástrojů*. Brno, 2009. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAREL OSIČKA.
- [47] KÖNIG, Wilfried., *Fertigungsverfahren. Band 1. Drehen, Fräsen, Bohren*. VID - Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
- [49] PLUHAR, Jaroslav., *Nauka o materiálu*. Praha, SNTL 1989.

- [50] SCHULZ, Heinz; CEBALO, Richard., *High Speed Machining*. In *Proc. 3rd Int. Conf. on Production Engineering CIM 95*. Croatian Academy of Sciences and Arts, Zagreb, 23-24.11.1995, p. D/79-D/91.
- [51] MÁDL, Jan., *Technologické obrábecí procesy a jejich optimalizace*. In *Zborník prednášok z 5. vedecké konferencie s medzinárodnou úcastou „CO-MAT-TECH '97“*, Trnava, STU 1997, s. 359-363, ISBN 80-227-0979-4.
- [52] BRINGAS, John E., *Handbook of comparative world steel standards*. ASTM, 2002. ISBN 0-8031-2088-5.
- [53] VASILKO, Karol., *Nové materiály a technológie ich spracovania*. 1. vyd. - Bratislava Alfa, 1990. 365 s. ISBN 80-05-00661-6.
- [54] KOCMAN, Karel., *Speciální technologie obrábění*. Brno PC-DIR Real, s.r.o., Brno, 1993. ISBN 80-214-1187-2. 213 s.
- [55] Aktuální příručka pro technický úsek Dashöfer, 1996-2000. 300 s.díl 5, ISBN 80-902247-2-5.
- [56] ČEP, Robert. : *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, 2005 s. 101. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Vladimír VRBA, CSc.

Seznam vlastních publikací související s prací

- [1] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef : *Zařízení pro indukční ohřev*. MM Spektrum, 2009, číslo periodika MM 2009/5, ISSN 1214-2572
- [2] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef : *Zařízení pro indukční ohřev*. Technický týdeník, ročník 2009, číslo 10/2009
- [3] KUNSTFELD Jaroslav, Brychta Josef: *Zařízení pro indukční ohřev ložisek*. Erin 2009, Ostrava 1.-2.dubna 2009, Katedra obrábění a montáže VŠB TU Ostrava, s. 70 + sborník na CD, ISBN 978-80-248-1982-2 Databáze Scopus.
- [4] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef, ČEP Robert : *Technologie Obrábění Al skořepin*. Poloprovoz, technologie. 004/08-04-2010-OT, VŠB-TU Ostrava, přihláška patentu. Databáze Scopus.
- [5] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef, ČEP Robert : *Technologie obrábění tenkostěnných* odlitků. Poloprovoz, technologie. 002/08-04-2010_OT, VŠB-TU Ostrava, přihláška patentu. Databáze Scopus.
- [6] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef, ČEP Robert: *Device for Induktion Heating of Bearnigs*. Vědeckotechnická společnost při Žilinské univerzitě, Žilina, SK , 2009, s.13-14. ISSN 1336-5967 Databáze Scopus.
- [7] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef, ČEP Robert: *Speciální sdružený nástroj*. Poloprovoz, technologie. 003/08-04-2010_OT. VŠB-TU Ostrava. Databáze Scopus.
- [8] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef, ČEP Robert: *Zkušební stanice obrábění*. Prototyp, funkční vzorek. 017/08-04-2010_F. VŠB-TU Ostrava. Databáze Scopus.
- [9] KUNSTFELD Jaroslav, KRATOCHVÍL Jiří: *Návrh nové technologie upínání statorů*. Poloprovoz, technologie. 022/26-07-2012_OT. VŠB-TU Ostrava. Databáze Scopus.
- [10] KUNSTFELD Jaroslav, KRATOCHVÍL Jiří: *Inprocesní měření při obrábění přírub elektromotorů*. 021/26-07-2012_OT. VŠB-TU Ostrava. Databáze Scopus.

- [11] KUNSTFELD Jaroslav, BRYCHTA Josef : *Problems of clamping rotary tools*.
Scientific-technical society by University of Zilina, Technological
Engineering, Volume XI, number 2/2014, Slovak Republik, s. 12 - 14,
ISSN 1336 - 5967

Seznam obrázků

3.01 Kleštinový upínač	11
3.02 Upínač Weldon	11
3.03 Hydraulický upínač	11
3.04 Sklíčidlový upínač	11
3.05 Termoupínač	11
3.06 Upínač KM4x	12
3.07 Graf průhybů různých upínacích systémů při zatížení	13
3.08 Řez hydroupínačem	14
3.09 Termoupínač s upínacím kuželem BT	15
3.10 Princip nastavení délky nástroje.....	15
4.01 Výsledná dráha relativního pohybu nástroje při frézování	18
4.02 Průřez frézou odebírané vrstvy materiálu	19
4.03 Obrázek sousledného a nesousledného frézování.....	20
4.04 Silové poměry při nesousledném a sousledném frézování	21
4.05 Symetrické frézování a v levé části nesymetrické frézování	23
4.06 Rozložení teplot v tříse, nástroji a obrobku	26
4.07 Rozložení tepelného pole při obrábění	26
4.08 Závislost rozložení tepelné bilance na řezné rychlosti	27
4.09 Reálný obrázek třísek vznikajících při sousledném obrábění.....	28
4.10 Povlakovaný a nepovlakovaný nástroj ze slinutého karbidu	30
4.11 Tabulka s názorným grafem oblastí aplikace nástrojových materiál	31
4.12 Princip lisování prášku v lisovacím nástroji	32
4.13 Povlak slinutých karbidů ve zvětšených řezech	33
5.1 Kriteria hodnocení opotřebení bříty	44
5.2 Délkové charakteristiky opotřebení	45
5.3 Typický průběh opotřebení	46
5.4 Zóny opotřebení řezného bříty	47
5.5 Obecná závislost opotřebení na čase a řezné rychlosti.....	48
5.6 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti	49
6.0 Drsnoměr Hommel tester T 1000	53
6.1 Parametry R_v , R_p , R_z	55
6.2 Parametry pro stanovení R_c	55
6.3 Parametr R_a	56
6.4 Parametr R_q	56
6.5 Parametr R_{sk}	57
6.6 Parametr RS_m	57

6.7 Parametr $R\Delta_q$	57
6.8 Parametr R_{mr}	58
6.9 Princip měření dotykovým profilometrem	58
7.01 Frézování členitého dílce s nakloněnou osou vřetene	60
7.02 Extrémě dlouhé nástrojové držáky upnuté v termoupínači	60
7.03 Stavebnice termoupínačů s různými nastavci pro frézování tvarových ploch	61
7.04 Sestava držáku se seřizovacím přípravkem, vpravo seřizovací přípravek	61
7.05 Jiná variant seřizovacího přípravku	62
7.06 Řez držákem s upnutým nástrojem	63
7.07 Návrh výrobně jednoduchého přístroje pro indukční ohřev	65
7.08 Návrh přístroje pro indukční ohřev s rozloženým induktorem	66
7.09 Blokové schéma zapojení elektroniky indukčního přístroje WNDI	66
7.10 Termoupínač upravený pro měření teplotního pole	67
7.11 Přístroj WNDI během zkoušek gradient ohřevu.....	67
7.12 Rozmístění jednotlivých měřících míst	69
8.1 Frézka FGS 40/50 připravená pro provádění zkoušek	71
8.2 Obrázek řídicího systému AJS 131 s ovládacími prvky.....	73
8.3 Měníč motoru vřetene se zapojenými přístroji	73
8.4 Ovládací panel stroje FGS 40/50 s ručními kolečky	74
8.5 Náčrt materiálu upnutého ve svěracích na stole frézky	75
8.6 Fotografie lomu břitu frézy	75
8.7 Fotografie stroje při měření házivosti nástroje	77
8.8 Sestava při nesousledném úběru materiálu.....	79
9.01 Měření drsnosti povrchu po obrobení jedné vrstvy materiálu	81
9.02 Měření házivosti upnutého nástroje přístrojem Magnescale	81
9.03 Sousledné frézování	82
9.04 Grafický výstup z přístroje Hommel tester T 1000	82
9.05 Sousledný způsob frézování s držákem Weldon	83
9.06 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro držák Weldon	83
9.07 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro termoupínač	84
9.08 Sousledný způsob frézování nástrojem upnutým v termoupínači	84
9.09 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro držák Weldon	85
9.10 Obrázek lomu špičky jednoho ostří, vpravo nepoškozené ostří	85
9.11 Obrázek dalšího nepoškozeného břitu stejného nástroje	86
9.12 Obrázek třetího poškozeného břitu abrazí, vpravo řezné úhly ostří	86
9.13 Detail poškozeného povrchu, ulomená špička nástroje	86
9.14 Obrázek výrobních vad nástrojů	86

9.15 Grafický vstoup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro kleštinový držák	87
9.16 Nesousledný způsob frézování	88
9.17 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro upínač Weldon	89
9.18 Nesousledný způsob frézování pro držák Weldon.....	89
9.19 Grafický výstup z přístroje Hommel Tester T 1000 pro termoupínač	89
9.20 Nesousledný způsob frézování pro termoupínač	90
9.21 Měření proudu na vstupu do měniče vřetena	91
9.22 Měření napětí na vstupu do měniče vřetena	91
9.23 Měření vibrací na obráběném materiálu, průběh celého program	92
9.24 měření vibrací na obráběném materiálu, přechod vibrací pozadí a obrábění	92
9.25 Měření vibrací ve velkém zvětšení	92
9.26 Příprava materiálu pro frézování kruhovou interpolací	93
9.27 Příprava materiálu pro frézování kruhovou interpolací sousledné frézování	93
9.28 Frézování kruhovou interpolací, sousledné frézování	94

Seznam tabulek

5.1 Tabulka pro výpočet regresní čáry	50
8.1 Tabulka doporučených řezných podmínek	76
9.1 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu kleštinový upínač sousledně	82
9.3 Naměřené hodnoty drsnosti pro upínač Weldon sousledné frézování	83
9.5 Naměřené hodnoty drsnosti pro termoupínač, sousledné frézování	84
9.6 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu, kleštinový upínač, nesousledné frézování	87
9.8 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu, upínač Weldon nesousledné frézování	88
9.9 Naměřené hodnoty drsnosti, termoupínač, nesousledné frézování	89
10 Tabulka s výsledky experimentu.....	95

Seznam grafů

7.1 Průběh teplot při ohřevu upínače č. 1	69
7.2 Průběh teplot při ohřevu upínače č. 2	70
9.2 Graf naměřených hodnot R_z , kleština sousledně	82
9.4 Graf naměřených hodnot R_z , Weldon sousledně	83
9.6 Graf naměřených hodnot R_z , termoupínač sousledně	84
9.7 Graf naměřených hodnot R_z , kleština nesousledně	87
9.9 Graf naměřených hodnot R_z , Weldon nesousledně	88
9.11 Graf naměřených hodnot R_z , termoupínač, nesousledně	89